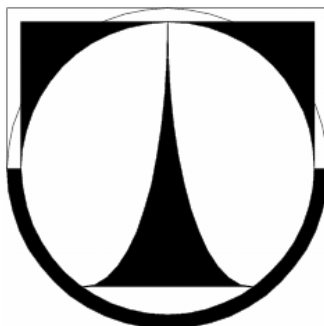




# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI FAKULTA STROJNÍ



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**2009**  
**Nedoma**

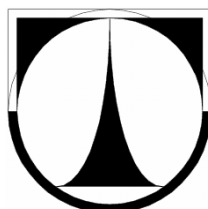
**Ladislav**



# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

**Fakulta strojní**

**Studijní program B2341 – Strojírenství**



**Studijní obor: 2301R022 Stroje a zařízení**

**Zaměření: Sklářské stroje**

## **Flexibilní úchopná hlavice pro manipulaci s velkými formáty skla**

**(Flexible gripping head handling with jumbo glass sheets)**

**KSR – 1623**

**Ladislav Nedoma**

**Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. František Novotný, CSc.**

**Konzultant bakalářské práce: Ing. Marcel Horák, PhD.**

### **Rozsah diplomové práce:**

<b>Počet stran:</b>	<b>47</b>
<b>Počet tabulek:</b>	<b>2</b>
<b>Počet obrázků:</b>	<b>28</b>
<b>Počet výkresů:</b>	<b>4</b>
<b>Počet příloh:</b>	<b>0</b>
<b>Počet modelů:</b>	<b>0</b>



**Datum odevzdání: 05. 06. 2009**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**TÉMA: Flexibilní úchopná hlavice pro manipulaci s velkými formáty skla**

***Anotace:***

Bakalářská práce předkládá návrh aktivní podtlakové úchopné hlavice (APÚH), která umožňuje eliminovat míru namáhání skla vlivem nepřesnosti polohování kinematického řetězce manipulačních zařízení a navíc minimalizuje přídatné zatěžování chapadla, resp. koncového členu mechanismu při koordinované činnosti dvou paralelně pracujících robotů během manipulace s velkými formáty skla.

První část se orientuje na seznámení se stávající situací v závodě AGC Flat Glass Czech, a. s. v Teplicích, kde jsou umístěny na konci linky jednoúčelové manipulátory, přičemž dnešním trendem je jejich náhrada průmyslovými roboty.

Druhá část se zabývá úchopnými podtlakovými prvky a systémy a možnostmi zdroje vakua.

Třetí část je konstrukční, jejím cílem bylo vyřešit a navrhnout konstrukci flexibilní úchopné hlavice, která umožňuje eliminovat nepřesnosti polohování a manipulaci se sortimentní řadou vyráběných formátů plochého skla. Konstrukční řešení úchopné hlavice je rozpracováno formou technické dokumentace.

Závěrečná část práce patří technickému zhodnocení navržené hlavice.

**Klíčová slova:** robotizovaná manipulace, přířezy skla, úchopná hlavice, vakuum



## **GRADUATION THESES**

**TOPIC:**        **Flexible gripping head handling with jumbo glass sheets**

### ***Annotation:***

Graduation theses makes suggestion of the active vacuum gripping head allowing elimination of the glass stress, which is caused by the inaccuracy effect of the kinematic chain handling device positioning. Likewise it minimizes the additional load of the gripper or more precisely of the last part of the coordinative operation mechanism of two parallel robots manipulating with jumbo glass formats.

The first part introduces the current situation in plant AGC Flat Glass Czech, Inc. in Teplice, where single-purpose manipulators are situated in the end of the unit, whereas today's trend is their replacement by industrial robots.

The second part deals with gripping vacuum items, systems and vacuum resources possibilities.

The third part is constructive. The aim was to solve and suggest construction of the flexible gripping head, which allows eliminating inaccuracy positioning effect and manipulation with the product line of manufactured formats of sheet glass. Constructional solution of the gripping head is described by the technical documentation.

The final part deals with technical evaluation of the designed gripper.

**Key words:** robotic handling, glass sheet, gripping head, vacuum



### **Poděkování:**

Rád bych poděkoval kolektivu lidí, kteří mi pomáhali při řešení této práce. Zvláště pak panu doc. Ing. Františku Novotnému, CSc., Ing. Marcelu Horákovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a obětavou spolupráci během řešení bakalářské práce.



**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Liberci dne: 05. 06. 2009

.....

Ladislav Nedoma



## **OBSAH**

<i>Anotace</i>	<i>1</i>
<i>Annotation</i>	<i>2</i>
<i>Poděkování</i>	<i>3</i>
<i>Obsah</i>	<i>5</i>
<i>Seznam použitých symbolů</i>	<i>7</i>
<b>1 Úvod</b>	<b>10</b>
1.1 Specifikace manipulace s plochým sklem.....	11
1.2.1 Manipulace na studeném konci linky.....	11
1.2 Současný stav řešené problematiky.....	12
1.3 Podtlakové úchopné systémy.....	13
1.3.1 Zdroje vakua.....	13
1.3.2 Podtlakové ÚH – přísavky.....	17
1.3.2.1 Pasivní podtlakové hlavice .....	17
1.3.2.2 Aktivní podtlakové úchopné hlavice.....	18
<b>2 Návrh alternativních řešení úchopných hlavic</b>	<b>20</b>
2.1 Rozbor silového zatížení přísavek.....	20
2.1.1 Koeficient bezpečnosti.....	22
2.2 Návrhy konstrukce ÚH.....	23
2.2.1 Varianta A.....	24
2.2.2 Varianta B.....	25
2.2.3 Varianta C.....	27
2.3 Výběr varianty pro konstrukční řešení.....	27
<b>3 Konstrukční řešení zvolené úchopné hlavice</b>	<b>29</b>



3.1	Stanovení rozmístění přísavek.....	29
3.2	Stanovení průhybů nosníku o dvou podporách.....	30
3.3	Optimalizace rozmístění přísavek v závislosti na průhybu skla pomocí počítačové simulace.....	35
3.4	Výpočet a volba přísavek.....	40
3.5	Návrh pracovního pneumatického obvodu.....	44
3.5.1	Kontrola doby vakuování.....	45
3.6	Technická dokumentace.....	45
<b>4</b>	<b>Závěr a zhodnocení využitelnosti</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>Použitá literatura</b>	<b>47</b>





## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

<u>Označení</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Název</u>
$a$	[ mm ]	rozteč přísavek
$a'$	[ mm ]	rozteč přísavek
$a_T$	[ m . s <sup>-2</sup> ]	tečné zrychlení
$a_t$	[ mm ]	délka tabule skla
$b$	[ mm ]	šířka pásu skla
$b'$	[ mm ]	šířka pásu skla
$b_t$	[ mm ]	šířka tabule skla
$c_{1-6}$	[ - ]	konstanty
$c_t$	[ mm ]	tloušťka tabule skla
$D_0$	[ mm ]	počáteční průměr přísavky
$d_h$	[ mm ]	průměr hadice
$d_i$	[ mm ]	průměr roztečné kružnice
$d_w$	[ mm ]	účinný průměr přísavky
$E$	[ MPa ]	modul pružnosti skla
$F_{AX}$	[ N ]	axiální síla
$F_B$	[ N ]	přítlačná síla
$F_i$	[ N ]	výslednice sil lokálního systému na přísavce
$F_{RAD}$	[ N ]	radiální síla
$F_{U_{sk}}$	[ N ]	skutečná úchopná síla
$F_{U_{teor}}$	[ N ]	teoretická úchopná síla
$g$	[ m . s <sup>-2</sup> ]	gravitační zrychlení
$G$	[ N ]	gravitační síla
$h$	[ mm ]	tloušťka skla
$H$	[ mm ]	maximální tloušťka skla
$J_T$	[ kg . m <sup>-2</sup> ]	moment setrvačnosti
$J_y$	[ m <sup>4</sup> ]	kvadratický moment pro pás skla
$J_{y'}$	[ m <sup>4</sup> ]	kvadratický moment pro pás skla
$K$	[ - ]	poměr objemů (přísavky)
$k$	[ - ]	bezpečnost
$k'$	[ - ]	bezpečnost proti posunutí
$k''$	[ - ]	bezpečnost proti odtržení



$L$	[ mm ]	délka pásu skla
$L'$	[ mm ]	délka pásu skla
$L_h$	[ mm ]	délka hadice
$m$	[ kg ]	hmotnost
$M_{(x)}$	[ Nm ]	moment v místě x
$M_B$	[ Nm ]	moment k bodu B
$M_D$	[ Nm ]	setrvační moment
$m_{SK}$	[ kg ]	hmotnost pásu skla
$m_{SK}'$	[ kg ]	hmotnost pásu skla
$m_t$	[ kg ]	hmotnost tabule skla
$n$	[ - ]	počet přísavek
$O$	[ N ]	odstředivá síla
$p_0$	[ MPa ]	koncový tlak
$p_1$	[ MPa ]	počáteční tlak
$p_a$	[ MPa ]	absolutní tlak na počátku vakuování
$p_k$	[ MPa ]	konečný tlak na konci vakuování
$Q$	[ l/min ]	spotřeba tlakového vzduchu
$q$	[ N/m ]	obtížení
$q'$	[ N/m ]	obtížení
$R$	[ mm ]	poloměr otáčení
$R_{Ax}$	[ N ]	reakční síla v bodě A ve směru osy x
$R_{Ay}$	[ N ]	reakční síla v bodě A ve směru osy y
$R_{Bx}$	[ N ]	reakční síla v bodě B ve směru osy x
$R_{By}$	[ N ]	reakční síla v bodě B ve směru osy y
$S$	[ l/min ]	sací výkon
$S_{max}$	[ l/min ]	maximální sací výkon
$S_w$	[ mm <sup>2</sup> ]	účinná plocha přísavky
$t$	[ s ]	doba vakuování
$T$	[ N ]	třecí síla
$T_{(x)}$	[ N ]	tečná síla v místě x
$t_c$	[ s ]	doba otáčení
$t_R$	[ s ]	doba rozběhu
$T_R$	[ N ]	zrychlující síla
$V$	[ l ]	evakuovaný uzavřený objem
$V_0$	[ l ]	konečný objem



$V_1$	[ l ]	počáteční objem
$V_{\text{ESG}}$	[ l ]	škodlivý objem přísavky
$V_{\text{SK}}$	[ m <sup>3</sup> ]	objem pásu skla
$V_{\text{SK}}'$	[ m <sup>3</sup> ]	objem pásu skla
$V_{\text{S}}$	[ l ]	škodlivý objem
$w_{(x)}$	[ mm ]	průhyb v místě x
x	[ mm ]	vzdálenost řezu
$\gamma$	[ ° ]	úhel ramena
$\Delta F$	[ N ]	přídavná síla
$\Delta p_u$	[ MPa ]	pracovní podtlak
$\Delta T$	[ N ]	přídavná třecí síla
$\varepsilon$	[ - ]	tuhost přísavky
$\varepsilon_B$	[ s <sup>-2</sup> ]	úhlové zrychlení brzdění
$\varepsilon_R$	[ s <sup>-2</sup> ]	úhlové zrychlení rozběhu
$\eta$	[ % ]	účinnost ejektoru
$\mu$	[ - ]	koeficient tření
$\pi$	[ - ]	Ludolfovo číslo (3,14)
$\rho$	[ kg . m <sup>-3</sup> ]	hustota skla
$\varphi$	[ ° ]	úhel natočení
$\varphi_B$	[ ° ]	úhel brzdění
$\varphi_R$	[ ° ]	úhel rozběhu
$\omega_U$	[ s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost

## 1. Úvod

Automatizaci a manipulační techniku v dnešní době můžeme nalézt v celé řadě technických, ale i netechnických oborů, hlavně pak ve strojírenství. Rozsáhlé uplatnění automatické manipulace je především na konci výrobních linek, kde je třeba rychle a přesně výrobky překládat na palety či k dalšímu zpracování. Dnešním trendem je nasazení flexibilních průmyslových robotů multiúhlové koncepce. Tyto roboty se vyznačují vysokou přesností polohování a lze je uplatnit v celé řadě manipulačních úloh a také technologických operacích jako je např. svařování, lakování, lepení atd. Ve sklářském průmyslu je nutné efektivně manipulovat s přířezy skla na vstupních a výstupních periferiích výrobních linek.

Bakalářská práce je zaměřena na koncepční řešení flexibilní úchopné hlavice pro manipulaci s velkými formáty skla.

V první kapitole je proveden rozbor výrobního procesu na studeném konci linky se zaměřením na specifika manipulace s plochým sklem s využitím vakuové techniky.

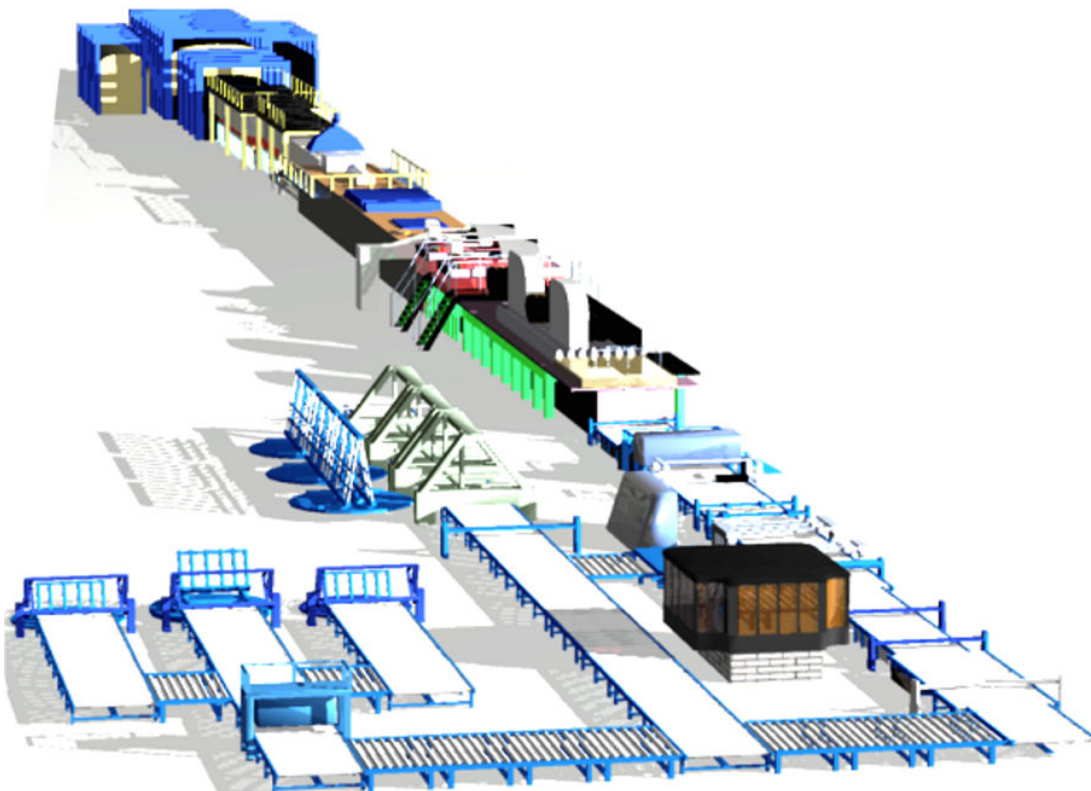
V kapitole druhé je uveden rozbor silového zatížení podtlakových úchopných prvků a jsou navrženy alternativně koncepční řešení úchopných hlavic a pomocí rozhodovací analýzy je vybrána optimální varianta pro konstrukční řešení.

Konstrukční část bakalářské práce již řeší vlastní konstrukci zvolené varianty, rozmístění přísavek, jejich optimalizaci a dimenzování. Navržená varianta je zpracována formou základních sestavných výkresů a tvoří přiloženou technickou dokumentaci.

V závěru je provedeno zhodnocení a přínos bakalářské práce.

## 1.1 Specifika manipulace s plochým sklem

Automatická manipulace ve sklářském průmyslu je značným způsobem ovlivňována nepříznivými vnějšími vlivy, které jsou důsledkem technologie výroby skla. Svá specifika má jak manipulace na teplém konci, tak i na studeném konci výrobní linky.



**Obr. 1.1** FLOAT – linka na výrobu plochého skla

### 1.1.1 Manipulace na studeném konci výrobní linky

Na studeném konci výrobní linky má automatická manipulace rozsáhlé uplatnění při výrobě skel k různým využitím, především však u plochého skla. Výroba plochého skla, která v současné době představuje přibližně polovinu celkového objemu produkce skla, kde jsou zpracovatelské procesy spojeny s velmi značným podílem manipulačních operací, jejichž základními problémy jsou:

- ✓ adhezní síly působící při oddělování jednotlivých přířezů,



- ✓ nutná ochrana proti poškození povrchu,
- ✓ malá tuhost tenkých přířezů skla.

Vzhledem k velikosti skleněných tabulí vyvstává problém s tuhostí přířezů a zvýraznění jejich deformací v průběhu manipulačních operací. Tyto deformace jsou podmíněny zejména těmito faktory:

- ✓ velikostí, typem a tuhostí přísavek,
- ✓ počtem a rozmístěním přísavek
- ✓ tuhostí rámu úchopné hlavice,
- ✓ geometrickými a materiálovými vlastnostmi skla,
- ✓ kinematickými parametry manipulační úlohy,
- ✓ vlastnostmi manipulačního zařízení apod.

Tenčí přířezy jsou náchylnější k deformacím, které jsou zdrojem velmi častých destrukcí skla, ke kterým dochází v koncových fázích manipulačních pohybů v blízkosti strojních zařízení a manipulačních periferií vlivem jejich nízké příčné tuhosti.

Přířezy skla se tzv. práškují nebo se mezi ně umísťují proužky kartonů či šňůrek, které zabraňují sklu se k sobě “přilepit“. Důvodem jsou velké adhezní (přilnavé) síly, které mezi přířezy vznikají. Pokud by tyto technologické postupy nebyly dodrženy, musí manipulátory či průmyslové roboty vyvinout velké síly, jenž by ve většině případů vedlo k destrukci přířezu či k nekontrolovanému odnímaní jednotlivých přířezů.

Jako ochrany před poškozením povrchu přířezu skla se využívá netkaných textilií, které jsou navlečeny na jednotlivé přísavky úchopných hlavic. Využití se týká jednak ochrany povrchu přířezů skla, ale i k ochraně před znečištěním pneumatických prvků, především po již zmíněném práškování přířezů. [1]

## 1.2 Současný stav řešené problematiky

Na většině výrobních linek se v dnešní době využívá specificky navržených jednoúčelových manipulátorů s aktivními podtlakovými úchopnými hlavicemi, které využívají pneumatických soustav k uchopení tabulí skla a přemísťují je na přistavené



palety. V současné době se pomalu přechází z jednoúčelových manipulátorů na průmyslové roboty multiúhlové koncepce. S velkými formáty skla by měli manipulovat dva paralelně pracující roboty, které ovšem musí být seřizeny tak, aby jeden robot zrcadlově přesně kopíroval pohyb robota druhého. Mezi přední výrobce průmyslových robotů a manipulátorů můžeme uvést např.:

- ✓ KUKA Roboter GmbH ([www.kuka.com](http://www.kuka.com))
- ✓ Grenzebach Group ([www.grenzebach.com](http://www.grenzebach.com))
- ✓ ABB ([www.abb.cz](http://www.abb.cz))
- ✓ Lovati Fratelli SRI ([www.lovatifratelli.com](http://www.lovatifratelli.com))
- ✓ Billco Manufacturing, Inc. ([www.billco-mfg.com](http://www.billco-mfg.com))
- ✓ Acimex ([www.acimex-vacuum-handling.com](http://www.acimex-vacuum-handling.com))
- ✓ Bystronic Glass ([www.bystronic.ch](http://www.bystronic.ch))
- ✓ Liebherr ([www.liebherr.com](http://www.liebherr.com))

### 1.3 Podtlakové úchopné systémy

V této podkapitole jsou rozebrány úchopné hlavice podle způsobu vyvozování úchopné síly (porovnání aktivních a pasivních přísavek), a dále pak možnosti zdroje stlačeného vzduchu.

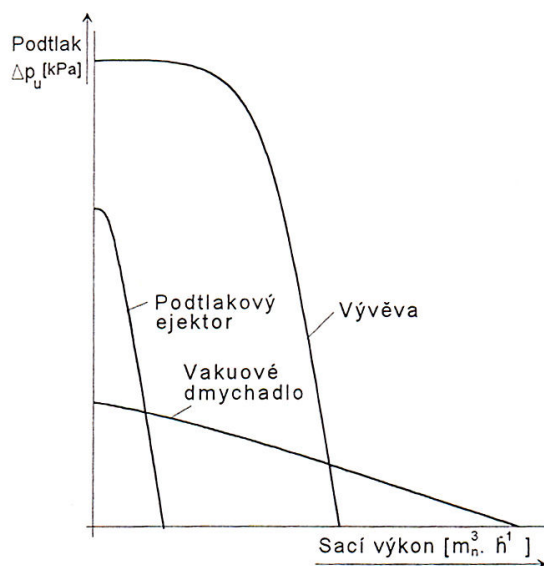
#### 1.3.1 Zdroje vakua

Při stavbě vakuového obvodu je důležitým prvkem volba typu a velikost zdroje vakua. V zásadě jsou možné dva rozdílné způsoby řešení, kdy zdroj vakua je externí (*obvod je připojen k centrálnímu rozvodu vakua - obdobnému jako je centrální rozvod stlačeného vzduchu*), anebo lokální, kdy vakuum je vytvářeno co nejbližší místu spotřeby. Pro volbu typu zdroje vakua jsou rozhodujícími parametry velikost podtlaku a sací výkon. Přitom je možné podle těchto parametrů a s přihlédnutím k specifickým požadavkům dané aplikace volit:

- ✓ vývěvu,

- ✓ sací dmychadlo,
- ✓ ejektor.

Jejich charakteristiky jsou uvedeny na (obr. 1.2). Obecně lze říci, že každý ze zdrojů vakua má své specifické přednosti, avšak nejhorším případem je současný požadavek vysokého sacího výkonu při vysoké míře vakua. To je spojeno se značnou spotřebou energie a tím současně vysokými náklady.



**Obr. 1.2** Porovnání charakteristik zdrojů vakua

### Vývěvy

Umožňují dosahovat poměrně vysokého podtlaku při malém objemovém průtoku, tj. při nepatrném sacím výkonu. Jsou zvláště výhodné tam, kde je nutné vytvářet podtlak v těsně uzavřeném prostoru s minimálními tlakovými ztrátami. Vývěvy lze rozlišovat podle způsobu utěšňování pracovních prostorů. Zatímco vývěva s během nasucho může pracovat v libovolné poloze, vodokružné a olejové vývěvy vyžadují horizontální umístění. Pro manipulační účely se nejčastěji užívají vývěvy s během nasucho, zejména pro ruční manipulátory, balící stroje a také pro vakuové upínání u výrobních strojů. S výhodou mohou být uplatněny u APÚH při manipulaci s velkoformátovými plochými objekty, kde je relativně dlouhá doba manipulačního cyklu a požadována dlouhá doba držení objektu.



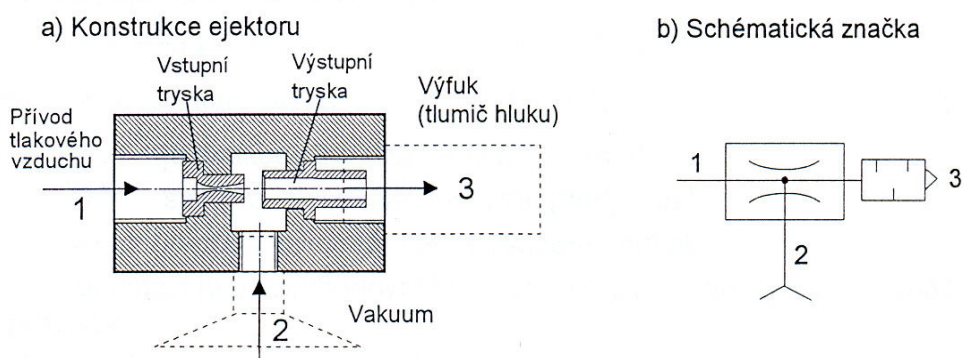
### Vakuová dmyhadla

Umožňují naproti tomu dosahovat pouze nízkou míru vakua ( - 0,01 až - 0,03 MPa) při velkých sacích výkonech ( $50$  až  $500 \text{ m}^3_n \cdot \text{h}^{-1}$ ). Mohou se efektivně aplikovat tam, kde jsou vakuovány velké, nebo špatně odtěsněné prostory s velkými ztrátami podtlaku a s požadavkem rychlé reakce. S výhodou se mohou uplatnit při manipulaci s pórovitými materiály (např. stavebními hmotami) a prodyšnými manipulačními jednotkami (např. pytli, krabicemi, přepravkami).

### Podtlakové ejektory

Jsou určeny pro relativně malý objemový průtok při možnosti dosažení až 85% vakua. Ejektory se na rozdíl od vývěv a dmyhadel, kde se podtlak vytváří na mechanickém principu, pracují čistě pneumaticky a jejich funkce je založena na tzv. Venturiho principu (obr. 1.3).

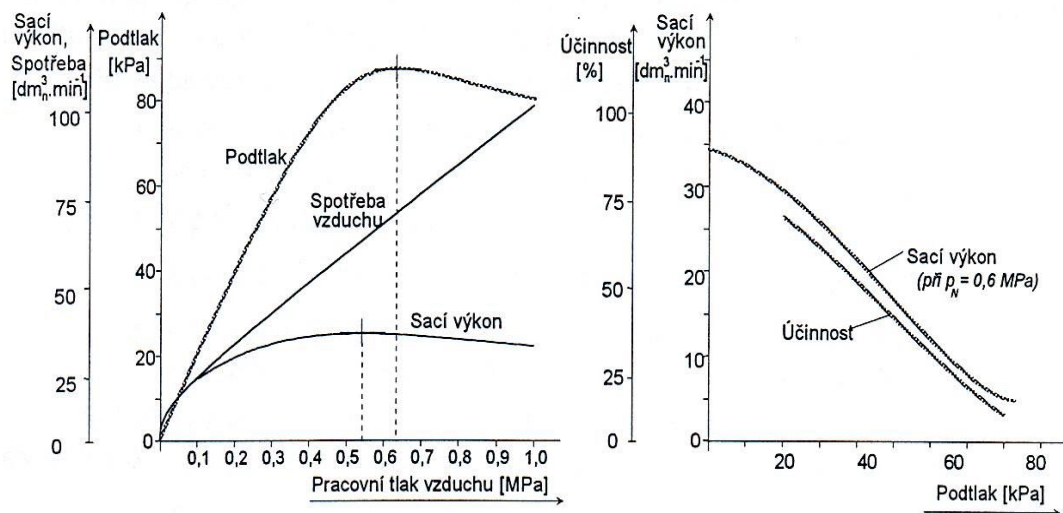
Tlakový vzduch proudí vstupní tryskou (Venturiho dýza) a jeho rychlost se zvyšuje a na výstupu dosahuje nadzvukové rychlosti. Tento vzduch následně expanduje a proudí výstupní tryskou většího průměru a vystupuje do ovzduší přes tlumič hluku. Volný paprsek vzduchu v mezeře mezi oběma tryskami strhává s sebou klidný vzduch, předává mu část kinetické energie a tak vzniká v tomto prostoru podtlak, který umožňuje nasávání vzduchu z podtlakové komory.



**Obr. 1.3** Princip ejektoru

Právě ejektory jsou velmi často aplikovány v případech aplikace APÚH při automatické manipulaci pomocí manipulátorů a PR, kde je výhodou jejich jednoduchost, minimální hmotnost a možnost snadného přivedení tlakového

vzduchu. Pro správný výběr a dimenzování ejektorů je nutná znalost jeho základních charakteristik. Podle (obr. 1.4) je zřejmé, že velikost dosažitelného podtlaku s velikostí použitého tlaku stlačeného vzduchu roste a maximální hodnoty bývá dosaženo při cca 0,6 MPa, poté již zůstává podtlak na konstantní úrovni, popř. mírně klesá. Spotřeba tlakového vzduchu přitom s velikostí tlaku proporcionálně roste. Sací výkon je extrémální funkce, která má maximum při pracovním tlaku stlačeného vzduchu 0,4 až 0,5 MPa, pak výrazně klesá, což přináší zvýšení spotřeby a pokles účinnosti ejektoru.



Obr. 1.4 Charakteristiky ejektoru

Účinnost ejektoru je dána vztahem:

$$\eta = \frac{S}{S + Q} \cdot 100\% \quad \text{resp.} \quad \eta = \frac{1}{1 + \frac{60 \cdot V}{t(\Delta p_u)}} \cdot 100\% \quad (1)$$

kde:  $S$  je sací výkon  $\left( = \frac{60 \cdot V}{t(\Delta p_u)} \right) [dm^3 \cdot min^{-1}]$

$V$  je evakuovaný uzavřený objem  $[dm^3]$

$Q$  spotřeba tlakového vzduchu  $[dm^3 \cdot min^{-1}]$

$t(\Delta p_u)$  je doba vakuování pro dosažení podtlaku  $\Delta p_u$   $[s]$

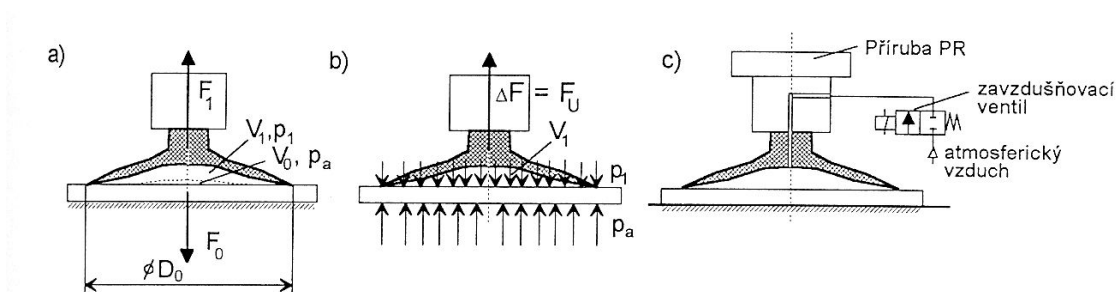
Účinnost je pak výhodným kritériem pro porovnání ejektorů různé konstrukce a provedení. [2]

### 1.3.2 Podtlakové úchopné hlavice – přísavky

Podtlakové úchopné hlavice lze podle způsobu vyvozování úchopné síly rozdělit na hlavice aktivní a pasivní. Aktivní hlavice je taková, kdy je její funkce ovládána přímo řízeným vstupem, prostřednictvím libovolného řídicího systému nebo akčního členu. U pasivních, tzv. deformačních přísavek není možné přímo ovládat úchopnou sílu, tj. chybí ovládací vstup.

#### 1.3.2.1 Pasivní podtlakové hlavice

Nejrozšířenějším typem pasivních podtlakových úchopných hlavice jsou deformační přísavky. K uchopení předmětu dochází podle (obr. 1.5) nejprve deformací přísavky jejím přitlačením na objekt, čím se zmenší objem pod přísavkou na hodnotu  $V_0$  přičemž lze předpokládat, že tlak je přitom roven atmosférickému tlaku, tedy  $p_0 = p_a = 10^5 \text{ Pa}$ . Pohybem úchopné hlavice se postupně přísavka deformuje a zvětšuje se objem vzduchu na hodnotu  $V_1$  současně se snižuje tlak na hodnotu  $p_1$ .



**Obr. 1.5** Silové poměry na deformační přísavce: a) princip vyvozování podtlaku, b) silová rovnováha na objektu, c) princip uvolňování objektu zavzdušňovacím ventilem

Za předpokladu konstantní teploty platí:

$$p_1 = p_a \cdot \frac{V_0}{V_1}$$

pak ze silové rovnováhy na objektu za předpokladu, že se počáteční průměr přísavky nezmění, dostaneme:

$$\Delta F = F_{Uteor} = \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot (p_a - p_1) = \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{V_0}{V_1}\right) \cdot p_a$$

pro obvyklé hodnoty poměru objemů platí:  $K = \frac{V_0}{V_1} = 0,2 - 0,5$

Předpoklad, že tlak pod přísavkou v okamžiku přitlačení přísavky na objekt je atmosférický, není přesně splněn ( *ve skutečnosti*  $p_0 > p_a$ ) a proto se zavádí korekce na tuhost přísavky

$\varepsilon = 0,6 - 0,8$  a skutečná úchopná síla bude:

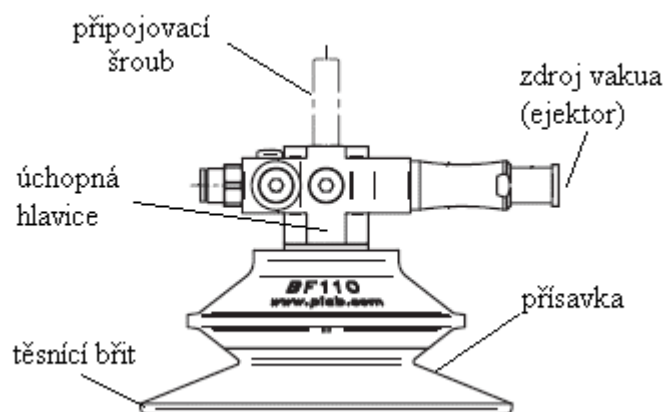
$$F_{Usk} = \varepsilon \cdot F_{Uteor} = \frac{\pi D_0^2}{4} \cdot (1 - K) \cdot \varepsilon \cdot p_a$$

Protože jde o jednostranné uchopení se značnou závislostí hodnoty úchopné síly na kvalitě povrchu, vlastnostech přísavky a také na době držení, je při dimenzování deformačních přísavek doporučován relativně vysoký koeficient bezpečnosti  $k = 4 - 6$ .

Problematické je při aplikaci deformačních přísavek rušení úchopné síly. Odtrhnutí objektu pomocí vnějších mechanických dorazů lze nahradit zavzdušněním prostoru pod přísavkou v okamžiku uvolňování objektu. Atmosférický vzduch je přiváděn pomocí elektricky ovládaného pneumatického ventilu (*obr.5.12c*). Je nutné zajistit minimalizaci škodlivého prostoru v zavzdušňovacím obvodu, aby nedošlo k výraznému snížení skutečné úchopné síly. [2]

### 1.3.2.2 Aktivní podtlakové úchopné hlavice

Aktivní podtlakové úchopné hlavice (APÚH) mají v současné době velmi rozsáhlé uplatnění nejen u manipulátorů a robotů, ale také u výrobních strojů, kde plní funkce upínačů, přidržovačů aj. Uplatňují se zejména pro uchopování a manipulaci s širokou škálou plochých objektů - desek z různých materiálů (*dřevo, plasty, skleněné tabule, plechy*), mají výrazné uplatnění v procesech balení, paletizaci, v polygrafickém průmyslu, v elektronice atd. Tomu odpovídá nejen obrovská škála typů, velikostí a provedení APÚH, které navazují na využití nabídky komponent řady specializovaných firem z nichž můžeme pro příklad uvést podniky: PIAB, SCHUNK, FESTO, SMC, SCHMALZ a další.



**obr. 1.6** Aktivní podtlaková úchopná hlavice (přísavka) od firmy PIAB

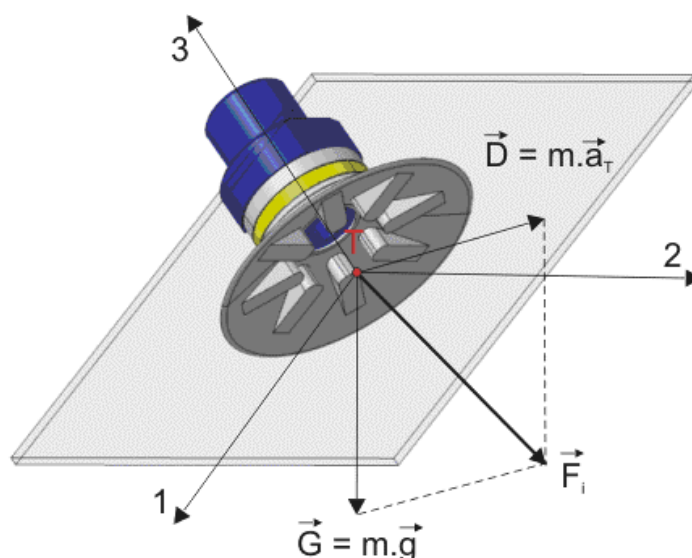
Podobně jako u pasivních přísavek je úchopná síla vyvozována díky rozdílu tlaku uvnitř a vně přísavky (obr. 1.6), která je svojí definovanou plochou přitisknuta na povrch objektu s tím rozdílem, že vzduch je z uzavřeného prostoru mezi tělesem a přísavkou odsáván aktivním způsobem pomocí externího vakuového zdroje (ejektor, vývěva, dmychadlo). [1]

## 2. Návrh alternativních úchopných hlavíc

Tato kapitola se věnuje koncepčním řešením nosných hlavíc zajišťující manipulaci s přířezy skla a výběru vhodné alternativy pro rozpracování technickou dokumentací.

### 2.1 Rozbor silového zatížení přísavky

Důležitým faktorem pro návrh úchopné hlavice s podtlakovými schopnými prvky je stanovení potřebné schopné síly pro bezpečné držení objektu během manipulace. Na objekt působí obecné dynamické síly, jejichž působíště je ve zvoleném lokálním souřadném systému v ose přísavky (*obr. 2.1*)



*Obr. 2.1 Zatížení přísavky*

Osy tohoto systému jsou ztotožněné s hlavními centrálními osami setrvačnosti objektu. Na základě tohoto předpokladu, lze psát:

$$m \cdot \vec{g} + m \cdot \vec{a}_T = \vec{F}_{1i} + \vec{F}_{2i} + \vec{F}_{3i}$$

Z hlediska zatěžování přísavky je vhodné situaci poněkud zjednodušit a rozdělit celkové silové zatížení do směru v ose přísavky (*axiální zatížení*) a ve směru

kolmém k ose (*radiální zatížení*). Tento předpoklad je zaváděn i z důvodu údajů v katalogových listech, kde jsou ve většině případů výrobcem uváděny maximální možné síly v těchto dvou směrech vzhledem k typu, průměru přísavky a hodnotě vakua. Předchozí vztah můžeme přepsat na:

$$F_{AX} = F_{3i} \quad \text{a} \quad F_{RAD} = \sqrt{F_{1i}^2 + F_{2i}^2}$$

Analyzujeme-li podmínky rovnováhy v interakci přísavky a objektu manipulace (*obr. 2.2*), pak platí vztahy:

$$\begin{aligned} T + \Delta T_P - F_{RAD} &= 0 \\ F_U - F_B - F_{RAD} - \Delta F &= 0 \end{aligned}$$

Na objekt působí ve směru osy z lokálního souřadného systému vnější síla  $F_{AX}$  a síla  $F_U$ , která je vyvozena pod tlakem  $\Delta p$  působícím na činnou plochu přísavky s průměrem  $d_w$ . V důsledku přitlaku přísavky  $p_B$  působí dále síla  $F_B$  a mezi dnem přísavky a objektem se projevuje přídavná síla  $\Delta F$ . Ve směru osy x pak působí v rovině uchopení síla  $F_{RAD}$  a posouvající síla  $T$  na těsnící ploše břitu. Díky tření na dně přísavky způsobené silou  $\Delta F$  lze definovat přídavnou sílu  $\Delta T_P = \Delta F \cdot \mu$ . Průměr  $d$  je v tomto případě tzv. geometrický průměr přísavky.

Pro stav mezní rovnováhy, tj. kdy bude síla  $\Delta F$  nulová, lze definovat teoretickou schopnou sílu:

$$F_{U_{teor}} = \frac{F_{RAD}}{\mu} + F_{AX} + F_B$$

Sílu  $F_B$  není jednoduché stanovit. Ve většině případech se předpokládá, že  $F_B < F_{AX}$  a lze ji zanedbat. Pro skutečnou úchopnou sílu obecně platí vztah (*pouze pro centrické uchopení*)

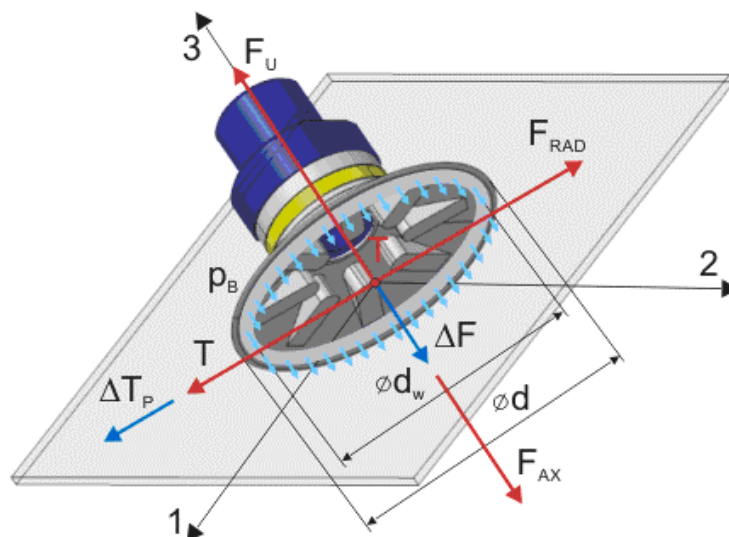
$$F_U = k \cdot \left( \frac{F_{RAD}}{\mu} + F_{AX} \right) \quad (2)$$

### 2.1.1 Koeficient bezpečnosti

Ze vztahu (2) by bylo možné pro zvolenou hodnotu podtlaku stanovit minimální činný resp. geometrický průměr přísavky za předpokladu, že vnější zatížení bylo definováno pro nejméně příznivý režim manipulačního cyklu. Je-li dále přesně znám koeficient smykového tření  $\mu$ , nejlépe experimentálně, lze navrhnout přísavku pro minimální koeficient bezpečnosti  $k=2$ . Obecně tedy platí, že pro manipulace s vertikální rovinou uchopení (*radiální zatěžování přísavky*) volíme větší hodnoty koeficientu bezpečnosti než při manipulačních úlohách, při kterých je přísavka zatěžována převážně axiálně. Z toho důvodu je vhodné vztah (2) přepsat do tvaru:

$$F_U = k' \cdot \frac{F_{RAD}}{\mu} + k'' \cdot F_{AX}$$

kde  $k'$  (*bezpečnost proti posunutí*) a  $k''$  (*bezpečnost proti odtržení*) jsou příslušné koeficienty bezpečnosti korespondující se směrem největšího zatížení přísavky pro které platí, že  $k' > k''$ . Běžné hodnoty koeficientů ve standardních dynamických režimech manipulační úlohy jsou  $k'=6-8$  a  $k''=4-5$ . [1]

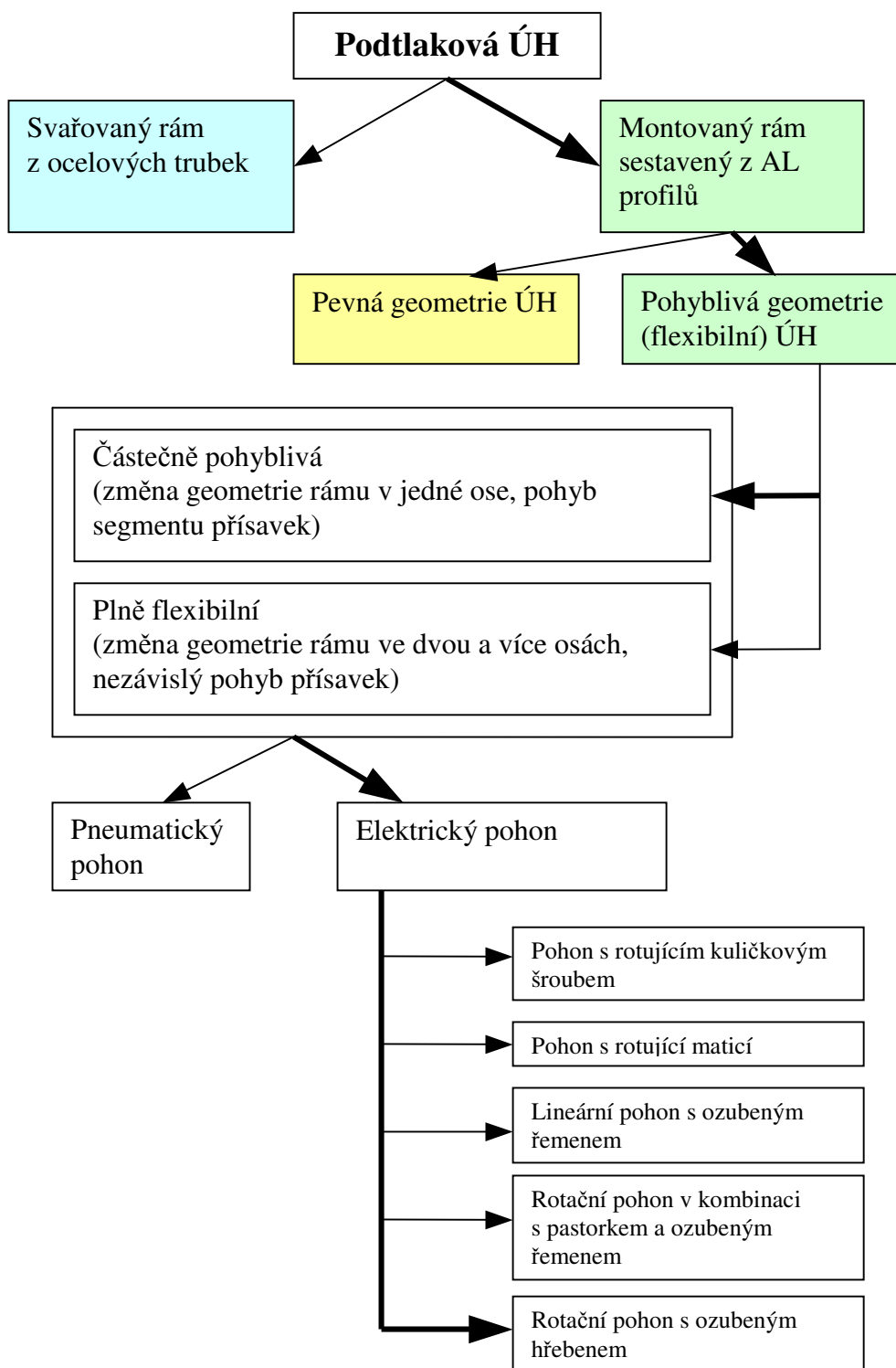


**Obr. 2.2** Analýza silové rovnováhy



## 2.2 Návrhy konstrukce úchopné hlavice

Základní možné varianty koncepčního uspořádání podtlakové úchopné hlavice jsou patrné z *obr. 2.3*, přičemž je zřejmé, že v rámci řešení bakalářské práce byly uvažovány pouze vybrané.

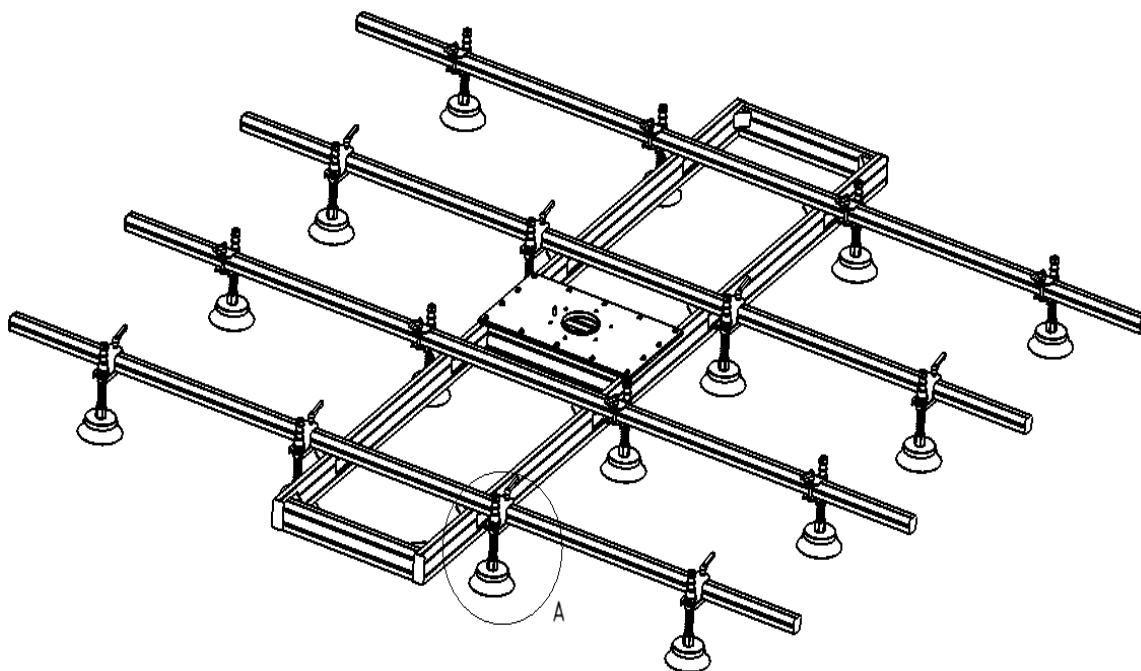


*Obr. 2.3 Rozdělení úchopných hlavice*

Jako řešení jsou uvažovány celkem tři koncepční varianty systému podtlakové úchopné hlavice pro robotizované pracoviště zajišťující manipulaci s PLF formáty skla na konci výrobní linky. Všechny varianty jsou navrženy s ohledem na předpokládanou nosnost hlavice (cca 200 kg) s cílem zajištění bezpečné manipulace tabulí skla v omezeném pracovním prostoru prostřednictvím dvou paralelně pracujících angulárních robotů KUKA KR 360-2 s nosností 360 kg s opakovatelnou přesností polohování  $\pm 0,15$  mm.

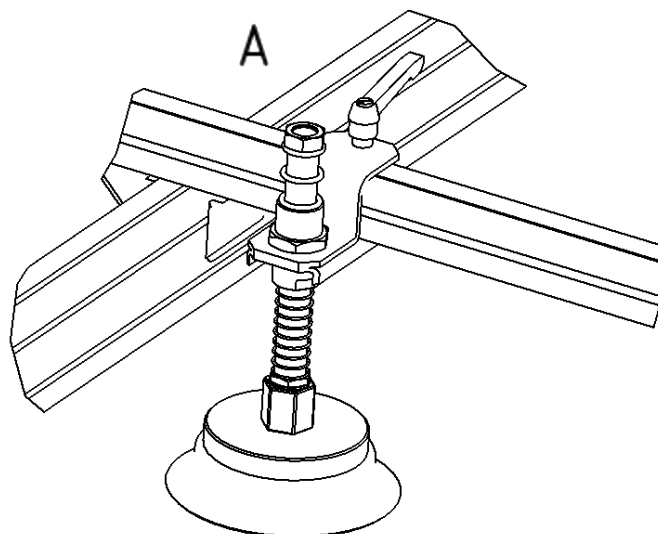
### 2.2.1 Varianta A

Jedná se o koncept montovaného rámu s využitím AL profilů firmy ITEM. Rám je tvořen dvěma hlavními profily „těžké“ řady o rozměrech  $80 \times 40 \times 3000$  mm, které tvoří uzavřený celek a dále čtyřmi profily s rozměry  $40 \times 40 \times 3000$  mm, představující jednotlivé příčné segmenty hlavice upevněné k hlavním profilům spojovacími prvky trojúhelníkového formátu.



*Obr. 2.4 a) Montovaný rám z AL profilů*

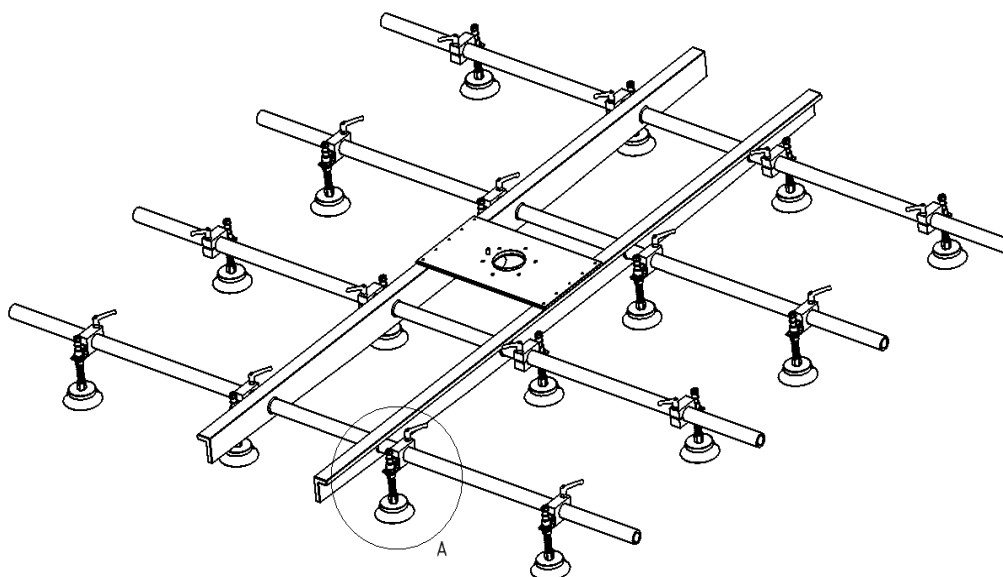
Přísavky jsou kotveny k profilům upevňovacími úhelníky viz. obr. 2.4 a,b. Rám je konstrukčně jednoduchý, levný a lehký se snadnou montáží. Díky snadnému upínání přísavky lze snadno měnit rozteč mezi přísavkami.



*Obr. 2.4 b) Detail uchycení přísavky a spojení profilů*

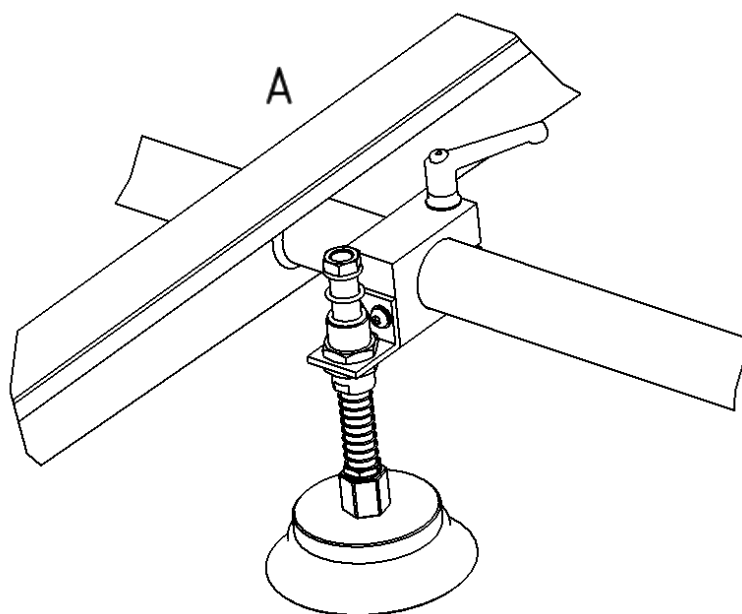
### 2.2.2 Varianta B

Variantou B je svařenec z dvou L profilů a čtyřech trubek kruhového průřezu o průměru 40mm a délkou 3000mm. Přísavky jsou k trubkám přimontovány pomocí navržených přípravků,

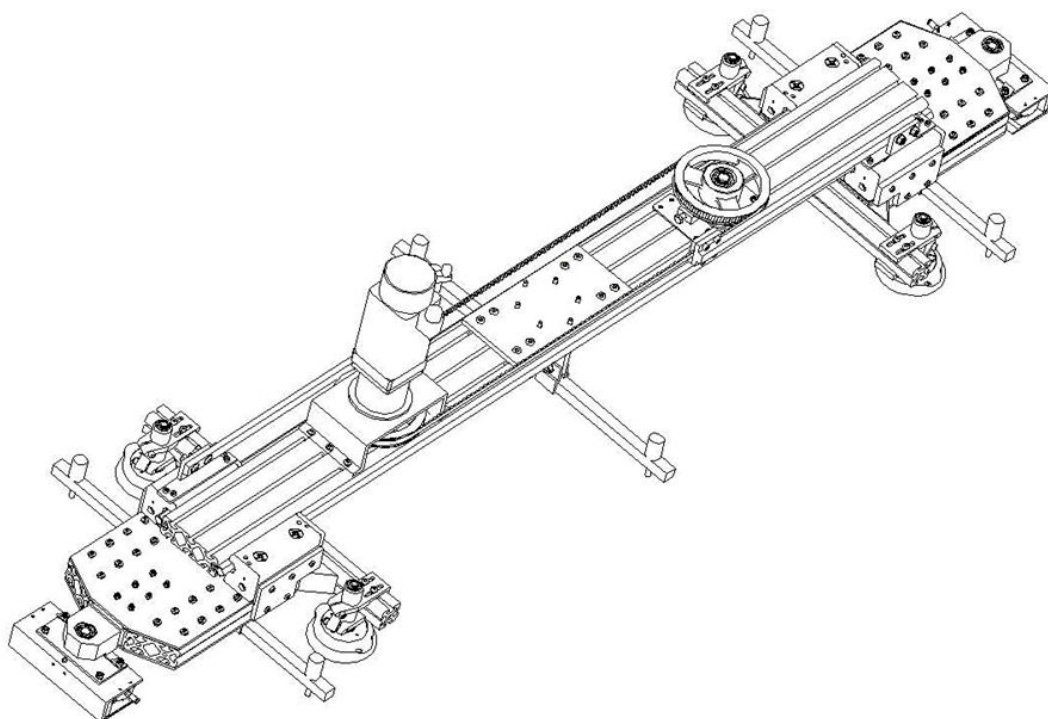


*Obr. 2.5 a) Svařovaný rám ze slitin AL*

které umožňují rychlou změnu polohy přísavky ve směru osy trubky a zároveň její natáčení viz obr. 2.5 a,b. Rám je z hlediska konstrukce jednoduchý, avšak svařenec je příliš robustní s vysokou hmotností a z výrobního hlediska finančně náročný.



*Obr. 2.5 b) Detail uchycení přísavky a přivaření trubky s profilem*



*Obr. 2.6 Částečně flexibilní úchopná hlavice montovaná z AL profilů*

### 2.2.3 Varianta C

Variantou C (*obr. 2.6*) je montovaná úchopná hlavice z extrudovaných AL profilů s částečně pohyblivou geometrií. Tento rám je opatřen motorickým pohonem, který výrazným způsobem zvyšuje hmotnost hlavice. Z hlediska četnosti výměn vyráběného sortimentu je pro náš případ motorické zařízení nadbytečné a nerentabilní. Rám se využívá především u dalšího zpracování přířezů skla, zejména pak u skel automobilových [3].

## 2.3 Výběr varianty pro konstrukční řešení

Pro vhodnou volbu úchopné hlavice je použita rozhodovací analýza (*tab. 2.1*). Pro analýzu jsou zvolena tato kritéria:

- ✓ hmotnost rámu,
- ✓ možnost modifikace,
- ✓ jednoduchost konstrukce,
- ✓ pořizovací náklady.

Možné varianty úchopných hlavic jsou zastoupeny v pravé části tabulky pouze písmeny:

- A Montovaný rám sestavený z AL profilů
- B Svařovaný rám z ocelových trubek
- C Montovaná ÚH s částečně pohyblivou geometrií

Protože jednotlivá kritéria mají rozdílnou míru závažnosti pro posuzování variant, je nutné stanovit jejich váhu. Vzhledem k obtížnosti posuzování většího počtu kritérií najednou se aplikuje pro stanovení pořadí důležitosti metoda párového srovnání (*tab. 2.2*). Výsledkem rozhodovací analýzy mezi třemi variantami úchopných hlavic, dle čtyř výše uvedených kritérií bylo stanoveno toto pořadí:

1. Montovaný rám sestavený z AL profilů
2. Svařovaný rám z ocelových trubek
3. Montovaná ÚH s částečně pohyblivou geometrií



Z výsledků rozhodovací analýzy je pro konstrukční řešení tedy vybrána varianta A.

Tabulka 2.1

Párové srovnávání kritérií					Matice užitečnosti alternativ							
Poř. č.	Název kritéria	Počet voleb	Pořadí významnosti	Váha	X		A		B		C	
					Hodnota		Hodnota		Hodnota		Hodnota	
					P	V	P	V	P	V	P	V
1.	Hmotnost rámu	1	2	2	100	200	90	180	70	140	65	130
2.	Možnost modifikace	3	4	4	100	400	85	340	60	240	90	360
3.	Jednoduchost konstrukce	2	3	3	100	300	70	210	80	240	30	90
4.	Pořizovací náklady	0	1	1	100	100	60	60	70	70	20	20
Celkem						1500		790		690		600
Užitečnost v relativním vyjádření (%)								79%		69%		60%
Pořadí alternativ podle užitečnosti								1.		2.		3.

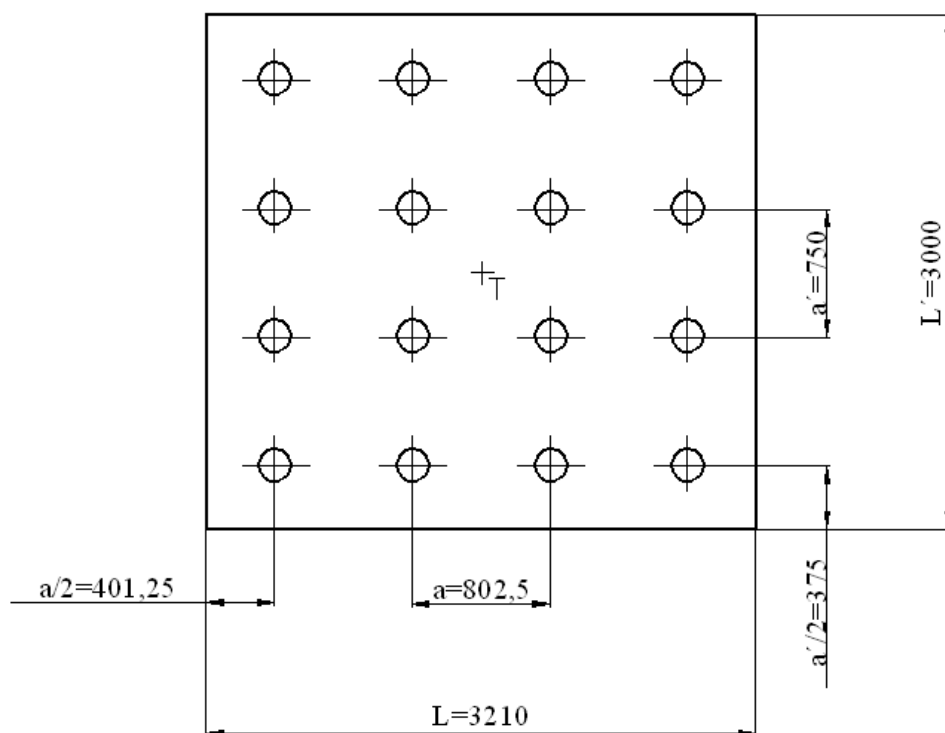
Tabulka 2.2

Párové srovnání				
	1.	2.	3.	4.
1.		2	3	1
2.	2		2	2
3.	3	2		3
4.	1	2	3	

### 3. Konstrukční řešení zvolené ÚH

#### 3.1 Stanovení rozmístění přísavek

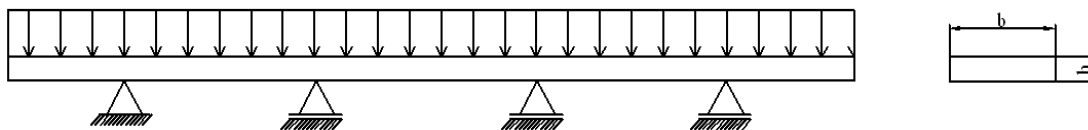
Předkládaná bakalářská práce řeší problematiku automatické manipulace s velkoformátovými tabulemi plochého skla typu PLF s hraničním rozměrem  $6000 \times 3210 \text{ mm}$ . Jedná se o dva paralelně kooperující průmyslové roboty multiúhlové koncepce, umístěných na společném pojezdovém ústrojí, které na konci kinematického řetězce disponují podtlakovou úchopnou hlavicí se 16 úchopnými prvky (přísavkami) z čehož vyplývá, že každý robot je zatížen cca. polovinou tabule s rozměrem  $3210 \times 3000 \text{ mm}$  jak je uvedeno na (obr. 3.1).



**Obr.3.1** Schéma tabule skla s návrhem rozmístění přísavek

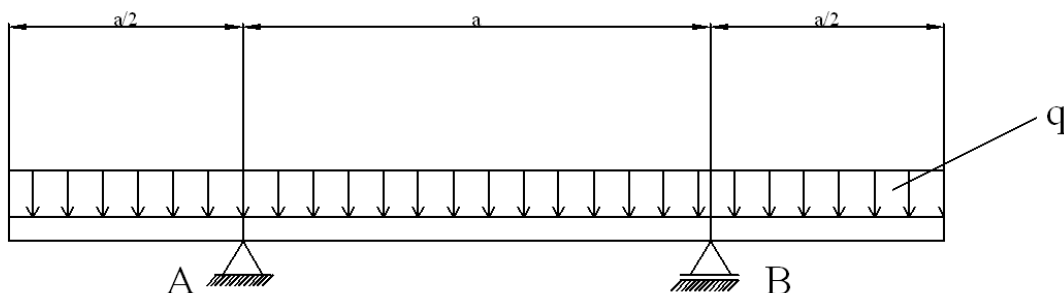
Vzhledem k tomu, že podrobný výpočet zatížení a zejména pak průhybových charakteristik uchopené tabule je poměrně komplikovaný, byla úloha zjednodušena ve smyslu nahrazení přířezu skla nosníkem, představující menší pásy skla s obdélníkovým průřezem ( $b \times h$ ) zatěžované vlastní tíhou  $q$  (obr. 3.2). Pro výpočet průhybů mezi přísavkami rozdělíme celou tabuli, resp. nosník na jednotlivé úseky

skla, které jsou umístěny na čtyřech podporách, kdy každá z nich představuje právě jednu podporu, tj. přísavku.



**Obr.3.2** Nosník o čtyřech podporách 2x staticky neurčitý

Takto navržený model představuje 2x staticky neurčitý nosník a je velmi obtížné určit jeho průhyby. Proto stanovíme průhyby skleněné tabule jako nosník o dvou podporách (obr. 3.3), kde je již staticky určitý. Tento krok můžeme bez obav provést, jelikož z hlediska bezpečnosti u nosníku na čtyřech podporách je zřejmé, že průhyb bude menší než na dvou podporách, zvláště přehlédneme-li k tomu, že se jedná symetrickou úlohu.



**Obr.3.3** Nosník o dvou podporách, staticky určitý

### 3.2 Stanovení průhybů nosníku o dvou podporách

Nosník o dvou podporách (obr 3.3) je zatěžován vlastní tíhou skleněné tabule, která je vyvozena z rozměrů menších úseků skla odpovídajícím jedné řadě přísavek.

<u>Zadané hodnoty :</u>	$L = 3210 \text{ mm}$	$L' = 3000 \text{ mm}$	$g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$
	$a = 802,5 \text{ mm}$	$a' = 750 \text{ mm}$	
	$b = 750 \text{ mm}$	$b' = 802,5 \text{ mm}$	
	$h = 3,5 \text{ mm}$	$H = 8 \text{ mm}$	
	$\rho = 2491,4 \text{ kg.m}^{-3}$	$E = 6,9e^{10} \text{ Pa}$	





Na základě vstupních parametrů byl postupně výpočtem stanoven objem, hmotnost, zatěžující síla a momenty setrvačnosti jak je uvedeno níže.

Vypočtené hodnoty :  $V_{sk} = V'_{sk} = L \cdot b \cdot h = 0,008 \text{ m}^3$

$$m_p = m'_p = V \cdot \rho = 21 \text{ kg}$$

$$G = G' = m_p \cdot g = 205,94 \text{ N}$$

$$q = G/L = 64,16 \text{ Nm}^{-1}$$

$$q' = G/L' = 68,65 \text{ Nm}^{-1}$$

$$J_y = (b \cdot h^3)/12 = 2,68 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$J_{y'} = (b' \cdot h^3)/12 = 2,867 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

Z podmínek rovnováhy sil je možné z rovnic (3),(4) a (5) stanovit složky reakcí v podporách A a B

$$x : R_{Ax} = 0, \quad (3)$$

$$y : R_{Ay} + R_{By} - 2qa = 0, \quad (4)$$

$$M_B : -R_{Ay}a + \frac{9}{8}qa^2 - \frac{1}{8}qa^2 = 0 \quad (5)$$

$$\Rightarrow R_{Ay} = qa$$

$$\Rightarrow R_{By} = qa$$

Dále na intervalu  $0 \leq x \leq \frac{a}{2}$  platí, že

$$-T_{(x)} - qx = 0 \quad \Rightarrow T_{(x)} = -qx$$

$$M_{(x)} + \frac{qx^2}{2} = 0 \quad \Rightarrow M_{(x)} = -\frac{qx^2}{2}$$

s okrajovými podmínkami

$$T_{(0)} = 0 \quad T_{(\frac{a}{2})} = -\frac{qa}{2}$$

$$M_{(0)} = 0 \quad M_{(\frac{a}{2})} = -\frac{qa^2}{8}$$

Pro střední část nosníku (interval II.)  $\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{3a}{2}$  platí, že

$$-T_{(x)} + R_{Ay} - qx = 0 \quad \Rightarrow T_{(x)} = q(a - x),$$



$$M_{(x)} + \frac{qx^2}{2} - R_{Ay} \left(x - \frac{a}{2}\right) = 0 \quad \Rightarrow M_{(x)} = qa \left(x - \frac{a}{2}\right) - \frac{qx^2}{2}$$

přičemž okrajové podmínky jsou definovány jako

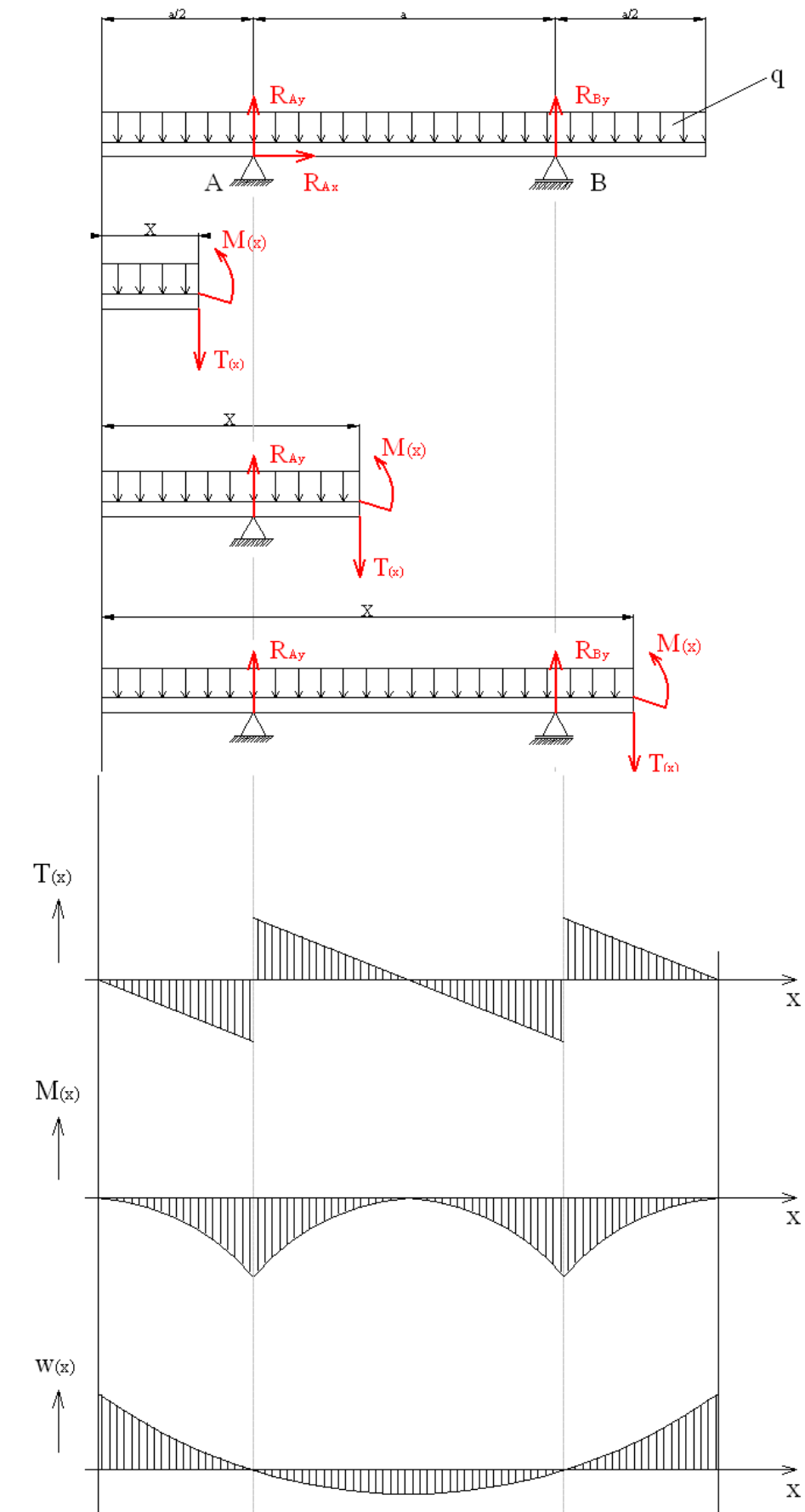
$$\begin{aligned} T_{\left(\frac{a}{2}\right)} &= \frac{qa}{2} & T_{\left(\frac{3a}{2}\right)} &= -\frac{qa}{2} \\ M_{\left(\frac{a}{2}\right)} &= -\frac{qa^2}{8} & M_{\left(\frac{3a}{2}\right)} &= -\frac{qa^2}{8} \end{aligned}$$

Obdobně pro poslední třetí interval  $\frac{3a}{2} \leq x \leq 2a$  lze psát, že

$$\begin{aligned} -T_{(x)} + R_{Ay} + R_{By} - qx &= 0 & \Rightarrow T_{(x)} &= q(2a - x) \\ M_{(x)} - R_{Ay} \left(x - \frac{a}{2}\right) - R_{By} \left(x - \frac{3a}{2}\right) + \frac{qx^2}{2} &= 0 \\ \Rightarrow M_{(x)} &= R_{Ay} \left(x - \frac{a}{2}\right) + R_{By} \left(x - \frac{3a}{2}\right) - \frac{qx^2}{2}, \end{aligned}$$

okrajové podmínky

$$\begin{aligned} T_{\left(\frac{3a}{2}\right)} &= \frac{qa}{2} & T_{(2a)} &= 0 \\ M_{\left(\frac{3a}{2}\right)} &= -\frac{qa^2}{8} & M_{(2a)} &= 0. \end{aligned}$$


Obr.3.4 Průběhy sil  $T$ , momentů  $M$  a průhybů  $w$

Průhyby v jednotlivých intervalech, resp. úsecích nosníku lze graficky znázornit na (obr. 3.4) a popsat vztahy

$$w_1(x) = \frac{q}{2EJ_y} \left( \frac{x^4}{12} + c_1x + c_2 \right) \quad (6)$$

$$w_2(x) = -\frac{q}{EJ_y} \left( -\frac{x^4}{24} + \frac{x^3a}{6} - \frac{x^2a^2}{4} + c_3x + c_4 \right) \quad (7)$$

$$w_3(x) = -\frac{q}{EJ_y} \left( -\frac{x^4}{24} + \frac{x^3a}{3} - a^2x^2 + c_5x + c_6 \right) \quad (8)$$

kdy po dosazení konstant respektujících okrajové podmínky

$$\begin{array}{lll} c_1 = -\frac{a^3}{12} & c_2 = \frac{7a^4}{192} & c_3 = \frac{a^3}{6} \\ c_4 = -\frac{5a^4}{128} & c_5 = \frac{31a^3}{24} & c_6 = -\frac{77a^4}{128} \end{array}$$

dostaneme postupně pro tři uvedené intervaly průhybové charakteristiky

$$w_1(x) = \frac{q}{24EJ_y} \left( x^4 - a^3x + \frac{7a^4}{16} \right)$$

$$\text{O.P.} \quad w_1(0) = \frac{7qa^4}{384EJ_y} \quad w_1\left(\frac{a}{2}\right) = 0$$

$$w_2(x) = -\frac{q}{EJ_y} \left( -\frac{x^4}{24} + \frac{x^3a}{6} - \frac{x^2a^2}{4} + \frac{a^3x}{6} - \frac{5a^4}{128} \right)$$

$$\text{O.P.} \quad w_2\left(\frac{a}{2}\right) = 0 \quad w_2\left(\frac{3a}{2}\right) = 0$$

$$w_{2\max}(a) = -\frac{qa^4}{384EJ_y}$$

$$w_3(x) = -\frac{q}{EJ_y} \left( -\frac{x^4}{24} + \frac{x^3a}{3} - a^2x^2 + \frac{31a^3x}{24} - \frac{77a^4}{128} \right)$$

$$\text{O.P.} \quad w_3\left(\frac{3a}{2}\right) = 0 \quad w_3(2a) = \frac{7qa^4}{384EJ_y}$$

Po dosazení dostáváme číselné hodnoty v okrajových podmínkách:

pro pás délky  $L$ 

$$w_1(0) = 0,002623m = \underline{2,623mm}$$

$$w_1\left(\frac{a}{2}\right) = 0$$

$$w_2\left(\frac{a}{2}\right) = 0$$

$$w_2\left(\frac{3a}{2}\right) = 0$$

$$w_{2\max}(a) = -0,0003747m = \underline{-0,3747mm}$$

$$w_3\left(\frac{3a}{2}\right) = 0$$

$$w_3(2a) = 0,002623m = \underline{2,623mm}$$

pro pás délky  $L'$ 

$$w_1'(0) = 0,002m = \underline{2mm}$$

$$w_1'\left(\frac{a'}{2}\right) = 0$$

$$w_2'\left(\frac{a'}{2}\right) = 0$$

$$w_2'\left(\frac{3a'}{2}\right) = 0$$

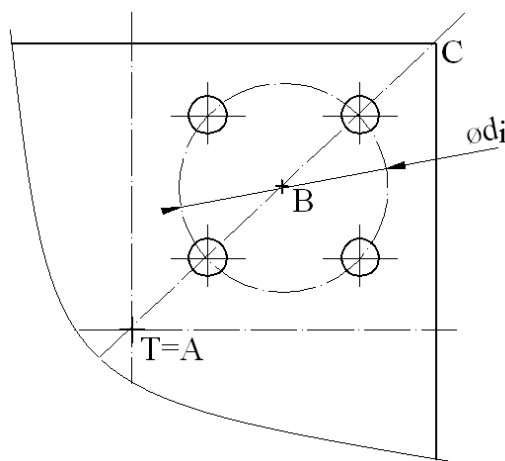
$$w_{2\max}'(a') = -0,000286m = \underline{-0,286mm}$$

$$w_3'\left(\frac{3a'}{2}\right) = 0$$

$$w_3'(2a') = 0,002m = \underline{2mm}$$

### 3.3 Optimalizace rozmístění přísavek v závislosti na průhybu skla pomocí počítačové simulace

V kapitole 3.2 byl proveden klasický výpočet průhybu nosníku, čímž byla reálná úloha výrazně zjednodušena a uvedené výsledky lze považovat za směrné hodnoty průhybu skla, které jsou v zásadě minimální a nepředstavují pro takto uchopenou tabuli skla riziko poškození vlivem vysokých hodnot ohybového napětí. Vzhledem k tomu, že cílem řešení je rovněž navrhnout optimální rozmístění přísavek vzhledem k uchopené tabuli, byla pomocí metody konečných prvků provedena analýza geometrie rozmístění přísavek (obr. 3.5).


průměry roztečné kružnice:

$$d_1 = 440 \text{ mm}$$

$$d_2 = 880 \text{ mm}$$

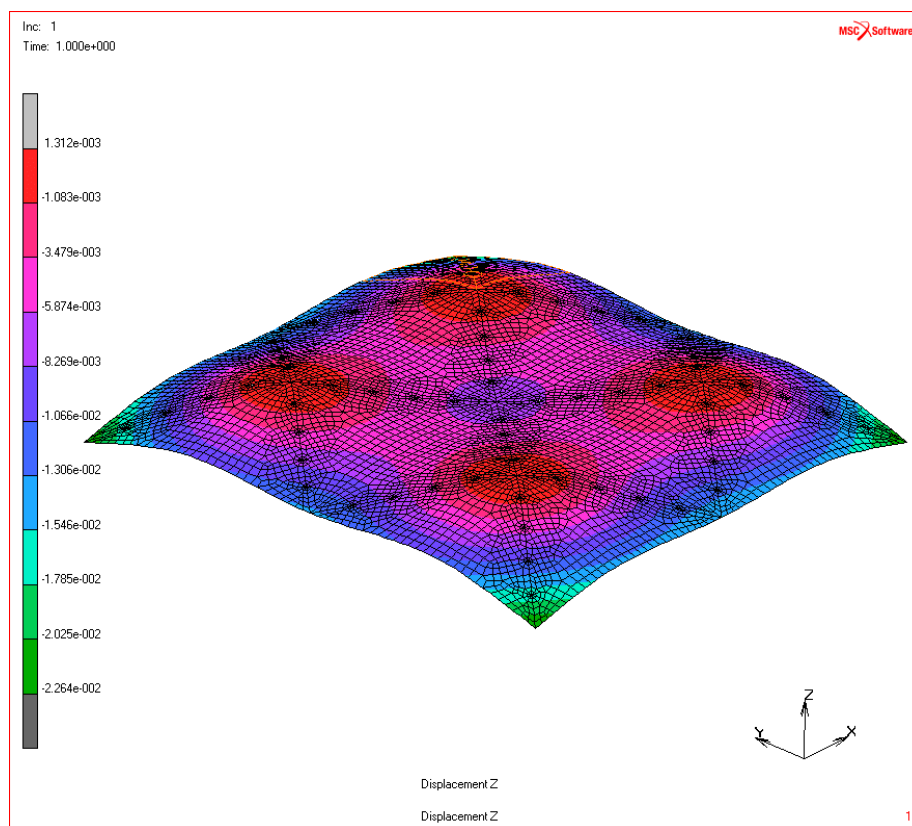
$$d_3 = 1320 \text{ mm}$$

$$d_4 = 1760 \text{ mm}$$

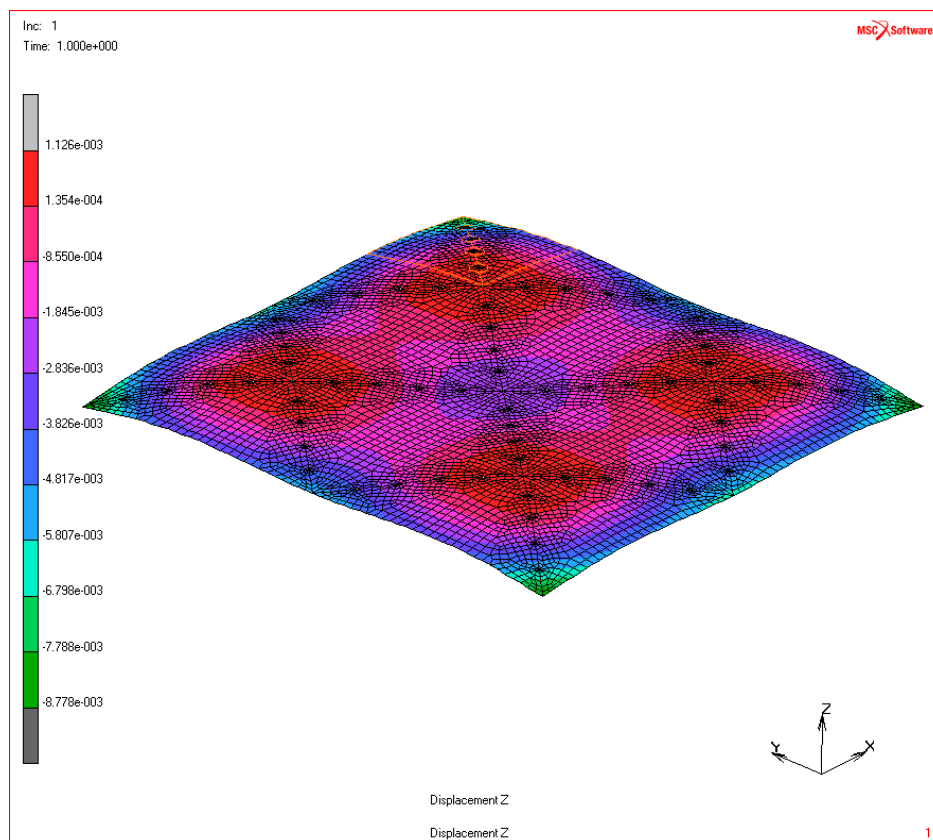
**Obr.3.5** Schéma umístění přísavek

Vzhledem k symetrii celé desky byla analýza provedena na jedné čtvrtině tabule. Z hlediska optimálního nastavení poloh přísavek byly navrženy roztečné kružnice o průměrech  $d_1 - d_4$  a byla provedena analýza průhybů desky. Průhyby byly sledovány na ose (úhlopříčce) procházející body  $A$  (těžiště),  $B$  (střed roztečné kružnice),  $C$  (roh). Je zřejmé, že průhyb závisí na tloušťce skleněné desky a na ideální poloze rozmístění přísavek, které je na průměru  $d_3 = 1320 \text{ mm}$ . U ostatních průměrů je průhyb vzhledem k rozmístění přísavek nevhodný (obr. 3.6 - 3.11).

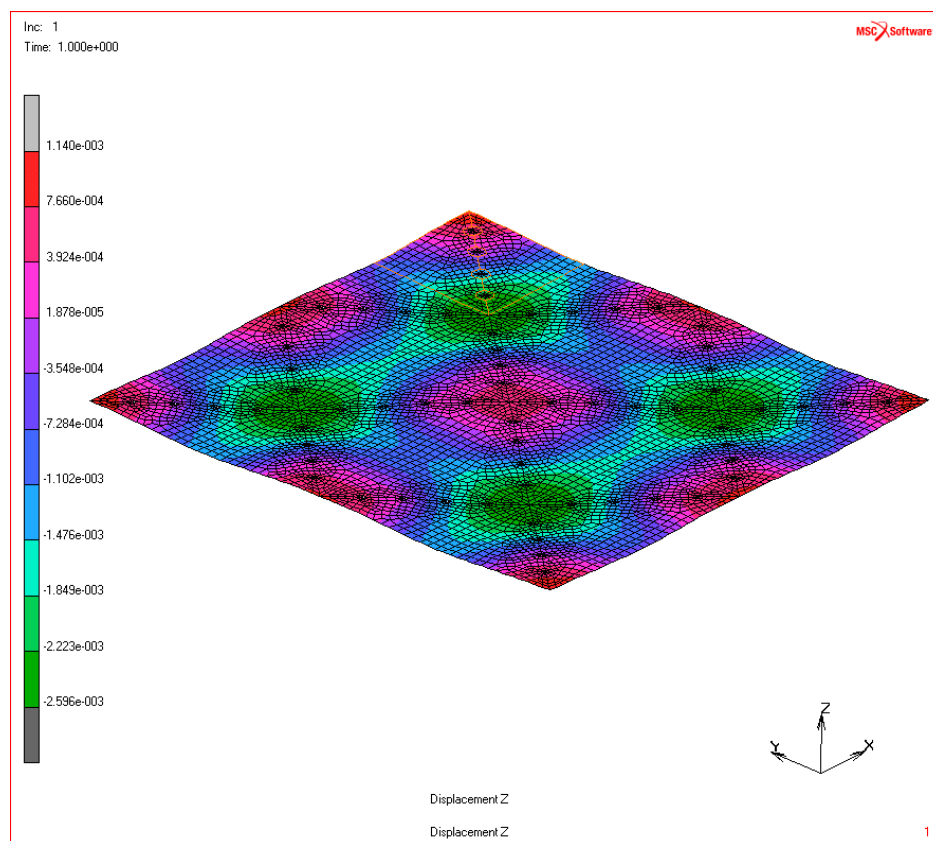
Počítačová simulace výrazným způsobem přispěla k efektivnímu rozmístění přísavek a je možné ji plně využít při návrzích konstrukčních řešení úchopné hlavice. Rovněž je nutné konstatovat, že uvedená analýza byla vzhledem k náročnosti řešení provedena pouze ve statickém režimu držení tabule a je nutné počítat s tím, že při velmi razantních dynamických cyklech budou absolutní hodnoty průhybu vyšší. V klidných režimech lze však výsledky provedené analýzy považovat za dostačující a uplatněný pseudostatický výpočet za reprezentativní.



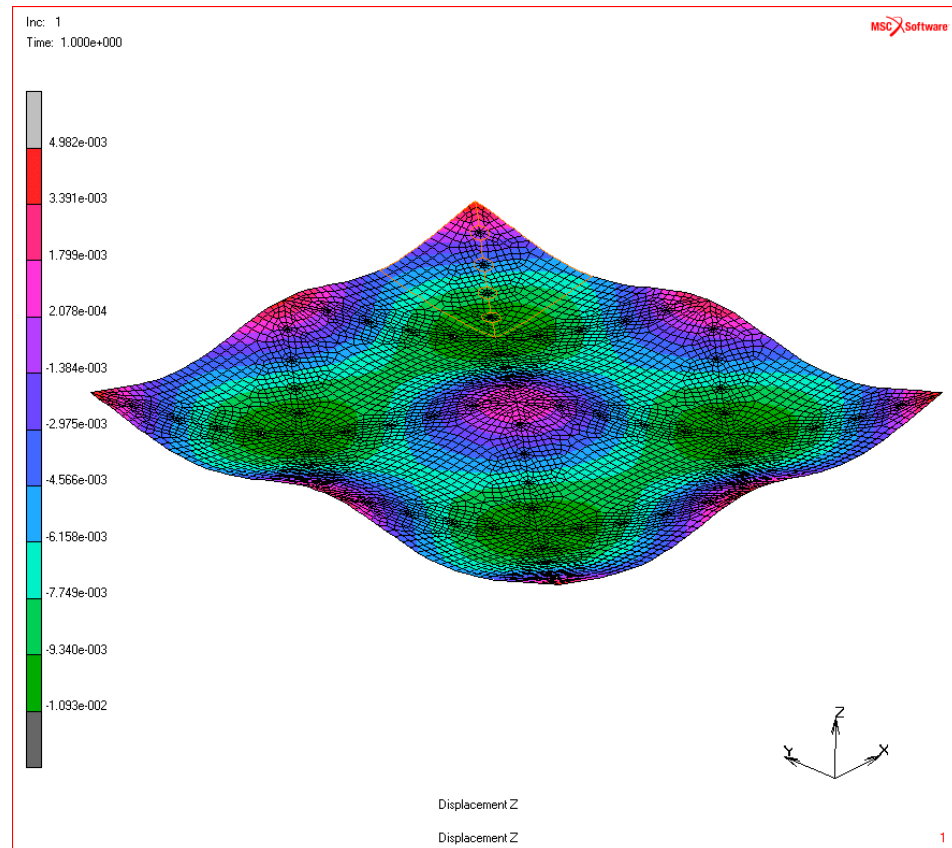
**Obr. 3.6** Průhyb tabule uchopené na roztečném průměru  $d_1 = 440 \text{ mm}$



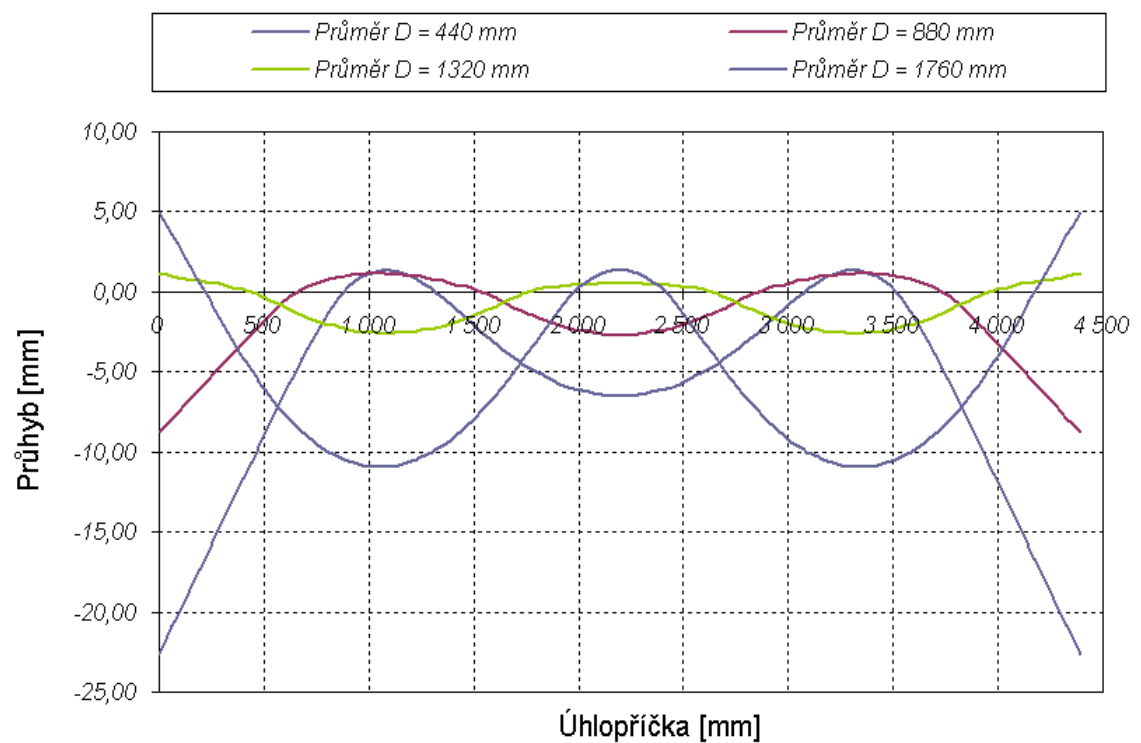
**Obr. 3.7** Průhyb tabule uchopené na roztečném průměru  $d_2 = 880$  mm



**Obr. 3.8** Průhyb tabule uchopené na roztečném průměru  $d_3 = 1320$  mm

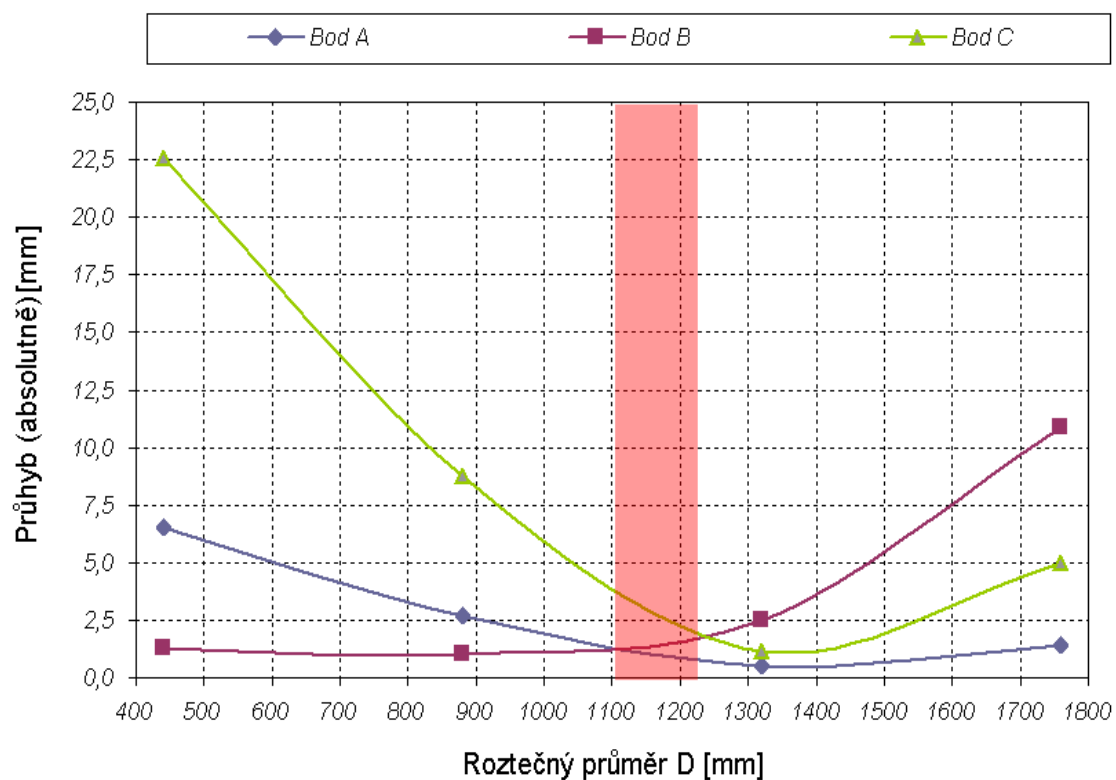


**Obr. 3.9** Průhyb tabule uchopené na roztečném průměru  $d_4 = 1760$  mm



**Obr. 3.10** Posunutí profilu tabule na úhlopříčce

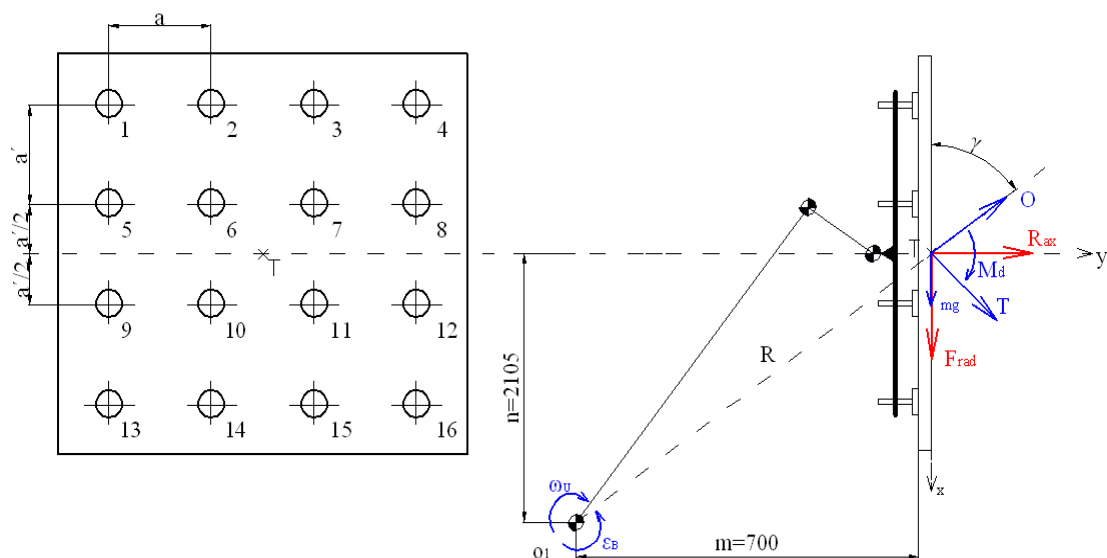




*Obr. 3.11 Optimální poloha úchopných prvků*

### 3.4 Výpočet a volba přísavek

Roboty jsou překládány skleněné tabule z dopravníku na palety. Rozběh a brzdění se děje v rozmezí zadaného úhlu rovnoměrně zrychleným pohybem. S ohledem na charakter úlohy a objektu byl zvolen počet a rozmístění přísavek na základě výpočtu v *kap. 3.2, resp. 3.3*. Byly zvoleny ploché přísavky umístěné ve čtyřech řadách v počtu  $n = 4$  přísavky v každé řadě, které jsou umístěny symetricky oproti těžišti. Jako materiál byl zvolen polyuretan, aby nedošlo k zanechání stop na tabuli skla.



**Obr. 3.12** Schéma uspořádání přísavek a zatěžování v nejméně příznivé poloze

#### Zadané hodnoty:

hmotnost tabule	$m_t = 200 \text{ kg}$
rozměry	$a_t \times b_t \times c_t = 3,21 \times 3 \times 0,008 \text{ m}$
počet přísavek	$n = 16$
rozteč přísavek	$a = 0,8025 \text{ m}$
rozteč řad	$a' = 0,750 \text{ m}$

#### Volené hodnoty:

úhel natočení	$\varphi = 100^\circ$
úhel rozběhu	$\varphi_R = 10^\circ$
úhel brzdění	$\varphi_B = 10^\circ$



dobu otáčení	$t_C = 2s$
součinitel tření	$\mu = 0,5$
pracovní podtlak	$\Delta p_u = 60kPa$
dobu uchopení	$t_u = 0,2s$
poloměr otáčení	$R = 1,5m$
materiál	polyuretan

Pro ustálenou rychlost pohybu platí

$$\omega_U = \frac{\varphi + 2\varphi_R}{t_C} = \frac{100 + 2 \cdot 10}{3} \cdot \frac{2\pi}{360} = 0,698s^{-1}$$

a zrychlení během rozběhu (brzdění)

$$\varepsilon_R = \varepsilon_B = \frac{\omega_U^2}{2\varphi_R} = \frac{0,35^2}{2\left(\frac{2\pi}{360} \cdot 10\right)} = 1,396s^{-2}$$

a pro dobu rozběhu platí

$$t_R = \frac{\omega_U}{\varepsilon_R} = \frac{0,698}{1,396} = 0,5s$$

Nejnebezpečnější poloha je vertikální, je zde největší zatěžování, tj. na počátku brzdění.

Poté podle obrázku (3.12) bude odstředivá síla:

$$O = m \cdot R \cdot \omega_U^2 = 200 \cdot 2,218 \cdot 0,698^2 = 216,1N$$

a zrychlující síla

$$T_R = m \cdot R \cdot \varepsilon_R = 200 \cdot 2,218 \cdot 1,396 = 619,3N$$

$J_T$  je moment setrvačnosti skleněné tabule k těžištní ose rovnoběžné s osou otáčení  $o_I$ .

$$J_T = m \cdot \frac{B^2}{12} = 200 \cdot \frac{3,21^2}{12} = 171,7kg \cdot m^{-2}$$

Dosazením momentu setrvačnosti dostaneme setrvačné zrychlení

$$M_D = J_T \cdot \varepsilon_B = 171,7 \cdot 1,396 = 239,7Nm$$



Výsledné dynamické zatěžování tabule skla nejprve transformujeme do lokálního souřadného systému.

$$F_x = F_{rad} = mg + T \sin \chi - O \cos \chi = 200 \cdot 9,81 + 619,3 \cdot 0,315 - 216,1 \cdot 0,949 = 1952N$$

$$F_y = F_{ax} = T \cos \chi + O \sin \chi = 619,3 \cdot 0,949 + 216,1 \cdot 0,315 = 655,8N$$

$$M_z = M_D = 329,7Nm$$

Vzhledem k symetrii zatěžování jednotlivých přísavek můžeme psát

$$F_{ax1-4} = \frac{1}{4} \left( \frac{F_{ax}}{4} + \frac{M_D}{3a'} \right) = \frac{1}{4} \left( \frac{655,8}{4} + \frac{239,7}{3 \cdot 0,75} \right) = 67,62N$$

$$F_{ax5-8} = \frac{1}{4} \left( \frac{F_{ax}}{4} + \frac{M_D}{a'} \right) = \frac{1}{4} \left( \frac{655,8}{4} + \frac{239,7}{0,75} \right) = 120,89N$$

$$F_{ax9-12} = \frac{1}{4} \left( \frac{F_{ax}}{4} - \frac{M_D}{a'} \right) = \frac{1}{4} \left( \frac{655,8}{4} - \frac{239,7}{0,75} \right) = -38,9N$$

$$F_{ax13-16} = \frac{1}{4} \left( \frac{F_{ax}}{4} - \frac{M_D}{3a'} \right) = \frac{1}{4} \left( \frac{655,8}{4} - \frac{239,7}{3 \cdot 0,75} \right) = 14,35N$$

$$F_{rad1-16} = \frac{F_{rad}}{16} = \frac{1952}{16} = 122N$$

Pro zvolenou bezpečnost  $k = 2$  lze stanovit potřebnou schopnou sílu přísavek

$$F_{U1-4} = k \left( F_{ax1-4} + \frac{F_{rad1-16}}{\mu} \right) = 2 \left( 67,62 + \frac{122}{0,5} \right) = 623N$$

$$F_{U5-8} = k \left( F_{ax5-8} + \frac{F_{rad1-16}}{\mu} \right) = 2 \left( 120,89 + \frac{122}{0,5} \right) = 730N$$

$$F_{U9-12} = k \left( F_{ax9-12} + \frac{F_{rad1-16}}{\mu} \right) = 2 \left( -38,9 + \frac{122}{0,5} \right) = 410N$$

$$F_{U13-16} = k \left( F_{ax13-16} + \frac{F_{rad1-16}}{\mu} \right) = 2 \left( 14,35 + \frac{122}{0,5} \right) = 516,7N$$

Se zadaným pracovním podtlakem  $\Delta p_u = 60kPa$  spočteme účinný průměr přísavky

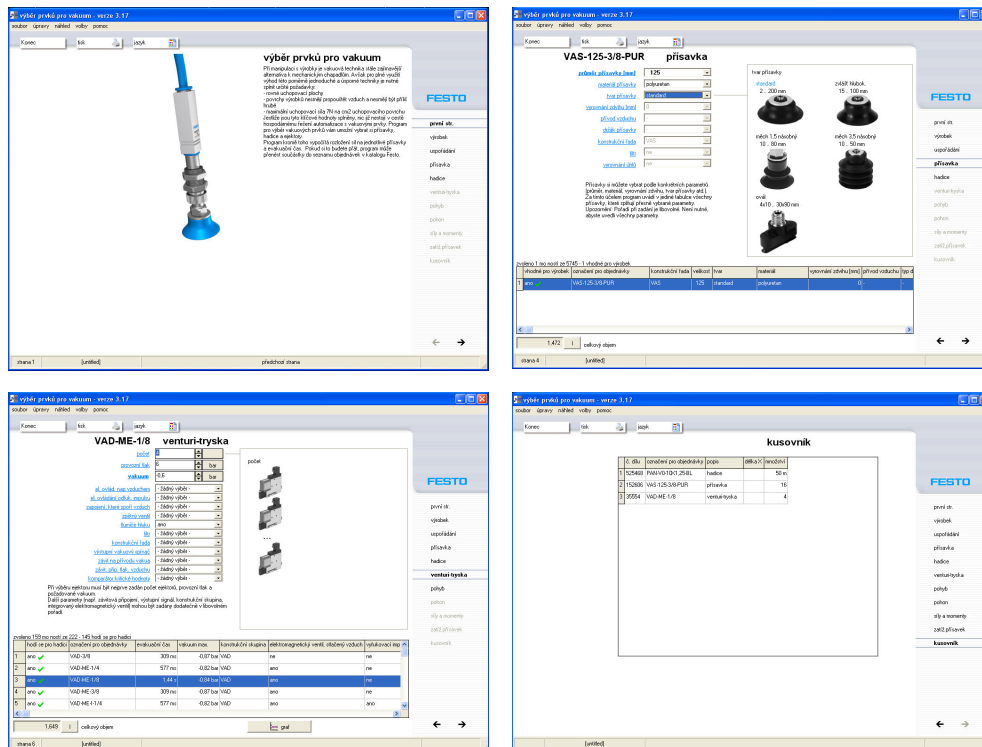
$$S_{w1-4} = \frac{F_{U1-4}}{\Delta p_u} = \frac{623}{0,06} = 10383mm^2 \Rightarrow d_{w1-4} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_{w1-4}} = 115mm$$

$$S_{w5-8} = \frac{F_{U5-8}}{\Delta p_u} = \frac{730}{0,06} = 12166,67 \text{ mm}^2 \Rightarrow d_{w5-8} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_{w5-8}} = 124,46 \text{ mm}$$

$$S_{w9-12} = \frac{F_{U9-12}}{\Delta p_u} = \frac{410}{0,06} = 6833,34 \text{ mm}^2 \Rightarrow d_{w9-12} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_{w9-12}} = 93,3 \text{ mm}$$

$$S_{w13-16} = \frac{F_{U13-16}}{\Delta p_u} = \frac{516,7}{0,06} = 8611,67 \text{ mm}^2 \Rightarrow d_{w13-16} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_{w13-16}} = 104,7 \text{ mm}$$

Dle výpočtu jsou zvoleny příslavky jednotného průměru vycházející z největší úchopné síly  $F_{U5-8} = 730 \text{ N}$ . Pro volbu nejvhodnějších komponentů byl využit softwarový program od firmy FESTO – VACUUM (výběr vakuových komponent).



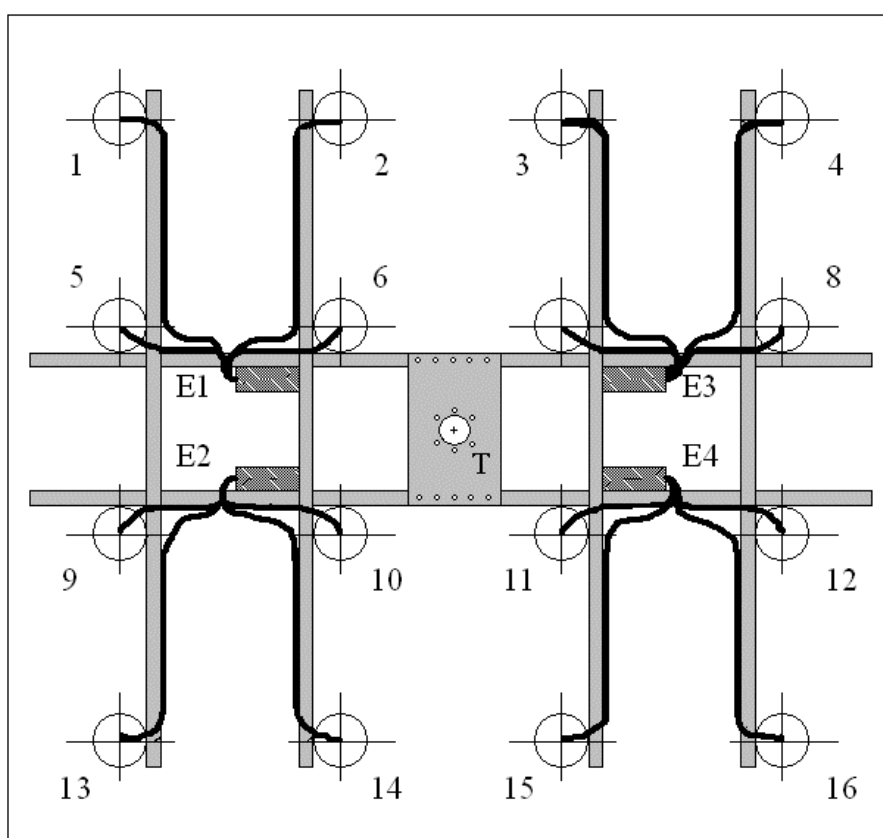
**Obr. 3.13** VACUUM softwarový program pro vakuové komponenty

S pomocí softwaru jsou voleny tyto komponenty:

Příslavky	FESTO ESG - 150 - PUR
Ejektory	FESTO VADM - 140
Hadice	FESTO PAN - VO – 10X 1,25 – BL

### 3.5 Návrh pracovního pneumatického obvodu

Z důvodu bezpečnosti byl navržen nezávislý čtyř okruhový systém vyvození úchopné síly s využitím čtyř ejektorů od firmy *FESTO VADM - 140* a 16 přísavkami *FESTO ESG - 150 - PUR*, propojených hadicemi *FESTO PAN - VO - 10X 1,25 - BL*. Ejektory jsou umístěny na hlavici symetricky oproti těžišti (*obr. 3.14*). Každé čtyři přísavky odpovídající jedné čtvrtině jsou napojeny na jeden ejektor zajišťující vakuování prostoru mezi přísavkami a deskou.



**Obr.3.14** Schéma umístění ejektorů

Schéma pneumatického obvodu je vypracováno formou technické dokumentace v příloze bakalářské práce (*viz. výkres č. 4-BP-S05000267-PS*).



### 3.5.1 Kontrola doby vakuování

Ejektory zvolené s pomocí softwarového programu VACUUM propojené hadicemi s vnitřním průměrem  $7,5 \text{ mm}$  a délkou v součtu u jednoho ejektoru  $L = 4 \text{ m}$ . Výrobce uvádí pro zvolené přísavky škodlivý objem  $174 \text{ cm}^3$ , k tomu připočteme objem hadic a tím získáme celkový škodlivý objem:

$$V_s = V_{ESG} + \frac{\pi \cdot d_h^2}{4} \cdot L_h = 174 + \frac{\pi \cdot 0,75^2}{4} \cdot 400 = 0,350 \text{ dm}^3$$

Firma FESTO uvádí v katalogu maximální sací výkon  $S_{max} = 265 \text{ l/min}$  při spotřebě tlakového vzduchu  $Q = 110 \text{ l/min}$ , pak pro zvolený podtlak  $\Delta p = 60 \text{ kPa}$  je absolutní tlak pod přísavkou  $p_k = 40 \text{ kPa}$ , pak lze spočítat dobu vakuování:

$$t = 1,3 \cdot \frac{60 \cdot V_s}{S_{max}} \cdot \ln \frac{p_a}{p_k} = 1,3 \cdot \frac{60 \cdot 0,35}{265} \cdot \ln \frac{100}{40} = 0,095 \text{ s}$$

$$0,095 \text{ s} < t_u = 0,2 \text{ s}$$

Vypočítaná doba je menší než zadaná doba uchopení a zvolené ejektory vyhovují.

### 3.6 Technická dokumentace

Výkres sestavy zvolené hlavice je zpracován v příloze formou technické dokumentace (výkresy č.

1-BP-S05000267-1,

1-BP-S05000267-2,

4-BP-S05000267-1-0-13,

4-BP-S05000267-PS).

#### 4. Závěr a zhodnocení využitelnosti

V souladu se zadáním bakalářské práce byly na základě rozboru výrobního procesu výroby plochého skla stanoveny základní technické podmínky pro návrh úchopné hlavice využitelné pro manipulaci s jumbo formáty plochého skla.

Byla provedena analýza silového zatížení úchopných prvků a také rozbor deformačního chování uchopené tabule skla s využitím počítačového modelování metodou konečných prvků. Dle technických požadavků, kterými byla především hmotnost úchopné hlavice a možnost změny geometrie rozmístění přísavek, byly postupně navrženy celkem tři varianty, ze kterých byla rozhodovací analýzou zvolena a dále podrobněji rozpracována varianta podtlakové úchopné hlavice na principu montovaného rámu z AL extrudovaných profilů, která plně zajišťuje požadovanou míru flexibility.

Rám hlavice byl osazen sadou šestnácti aktivních přísavek, prostřednictvím rychloupínacích přípravků od firmy SCHMALZ, pomocí kterých lze snadno a rychle změnit geometrii rozmístění přísavek v závislosti na manipulovaném sortimentu.

Během manipulačního cyklu rovněž dochází k namáhání skla vlivem působení dynamických sil, zejména při rozběhu nebo naopak brzdění manipulačního zařízení, které mohou být zdrojem vzniku nežádoucích mikrotrhlin ve skle a mohou vést až k samotné destrukci uchopené tabule. Tento efekt je výrazným způsobem eliminován použitím individuálních kompenzátorů polohy, které rovněž zajišťují korekci vertikální polohy přísavek od kontaktní roviny (horní plochy) tabule skla, čímž jsou odstraněny případné chyby v nivelaci. Konstrukční řešení flexibilní úchopné hlavice je popsáno v kapitole 3 a výkresová dokumentace hlavice je přiložena formou sestavných výkresů.

**Závěrem lze konstatovat, že bakalářská práce prezentuje v současné době jednoznačný trend náhrady jednoúčelových manipulátorů systémy paralelně kooperujících průmyslových robotů multiúhlové koncepce kinematického řetězce, předkládá možnost využití počítačové simulace při návrhu a optimalizaci podtlakových úchopných hlavice a ukazuje možnosti aplikace modulární koncepce konstrukčního řešení rámu hlavice, která jednoduchým způsobem zajišťuje rychlou modifikaci geometrie v závislosti na charakteristice manipulovaného objektu.**





## 5. Použitá literatura

- [1] Horák, M.: *Dynamická manipulace s tenkými deskami skla*. Liberec: TU v Liberci, KSR, 2005
- [2] Novotný, F.: *Efektory průmyslových robotů*. Skriptum TU v Liberci, v tisku
- [3] Hort, Z.: *Koncepce řešení manipulace u pece TGL ESU EcoMax*. Liberec: TU v Liberci, KSR, 2007
- [4] Vávra, P.: *Strojnické tabulky*. Praha: Scientia, spol. s r.o. 2000, ISBN 80-7183-164-6
- [5] Katalog firmy PIAB, *Vakuum pro automatizaci*, [www.piab.com](http://www.piab.com)
- [6] Katalog firmy SCHMALZ, *Vakuum-Komponenten*, 2009/2010, [www.vacuworld.com](http://www.vacuworld.com)
- [7] Katalog firmy ITEM, *MB Systembaukasten*, 1995, [www.item.info/en/](http://www.item.info/en/)
- [8] [www.kuka-robotics.com/czech\\_republic/cs/](http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/)
- [9] [www.festo.com/INetDomino/cz/cs/company\\_portal\\_cz.htm](http://www.festo.com/INetDomino/cz/cs/company_portal_cz.htm)